

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Distribuované měření teploty nestandardními typy
optických vláken

Distributed temperature measurement using non
standard optical fibers

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Bronislav Feču

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Distribuované měření teploty nestandardními typy optických vláken

Distributed temperature measurement using non standard optical fibers

Zásady pro vypracování:

V současnosti zažívají vláknově optické senzory velký rozvoj, zejména pokud jde o senzory pro průmyslové aplikace. Cílem práce je pochopení základních principů a zvládnutí měření pomocí distribuovaných vláknových senzorů v laboratorních podmínkách.

1. Proveďte rozbor vlastností jednotlivých typů distribuovaných vláknově optických senzorů.
2. Změřte teplotu podél 100 m dlouhého úseku MM vlákna a stanovte teplotní a prostorové rozlišení.
3. Porovnejte naměřené výsledky s jinými typy vláknových teplotních senzorů.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010



prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7.5.2010

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce panu prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za všestrannou pomoc a odborné vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat ing. Janu Látalovi za poskytnutí literatury a pomoc při praktických měřeních.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou možností použití jednotlivých typů distribuovaných vláknově optických senzorů. Je zde vysvětlen princip jejich činnosti a jejich konstrukce. V další části práce pojednává o možnostech využití těchto senzorů při měření teploty. V praktické části je provedeno měření teploty pomocí několika typů distribuovaných vláknově optických senzorů. Měření je uskutečněno v laboratorních podmínkách několika metodami. Naměřené údaje jsou analyzovány a porovnány s hodnotami získanými při měření pomocí ostatních typů vláknově optických senzorů. Porovnání naměřených výsledků je provedeno z hlediska přesnosti měření teploty, opakovatelnosti měření, náročnosti měření, technického vybavení nutného pro měření a ceny přístrojů nutných pro měření.

Klíčová slova

Distribuovaný vláknově optický senzor, Braggovy mřížky, Ramanův jev, měření teploty, DTS, spektrometr, Ramanův OTDR-metr, kalorimetr, optická vlákna, lasery

Abstract

Graduation thesis deals with analytic possibilities of using particular types which distribute fibrous-visual sensing elements. Principle of their activities and their constructions is made clear in this graduation thesis. The next part talks about possibilities of using these sensing elements during temperature measuring. Temperature measuring is taken by the help of several types of distributed fibrous-visual sensing elements in practical part. Measurement is realized by several methods in laboratory conditions. Measuring data is analyzed and confronted with values which are gained during measurement with the help of other types of distributed fibrous-visual sensing elements. Calibration of measuring data is realized in term of precision of temperature measuring, repeatability of measurements, intensity of measurements, technical equipment and price of instruments which are necessary for measurement.

Keywords

Distributed fibrous-visual sensing elements, Bragg's grating, Raman's effect, temperature measuring, DTS, spectrometer, Raman's OTDR-meter, calorimeter, visual fibres, lasers

Seznam použitých zkratek

α	[dB/km]	útlum optického vlákna
λ	[nm]	vlnová délka optického záření
λ_{bragg}	[nm]	Braggova rezonanční vlnová délka
λ_s	[nm]	Stokesova vlnová délka
λ_{a-s}	[nm]	anti-Stokesova vlnová délka
Θ		prostorový úhel
Λ		perioda Braggovy mřížky
$\Delta\alpha$		optický útlum mezi Stokesovou a anti-Stokesovou částí spektra
a	[μm]	průměr optického vlákna
APD		Avalanche Photo Diode – typ lavinové fotodiody
c	[m/s]	rychlost světla ve vakuu
DTS		Distributed Temperature Sensing system – distribuované systémy měření teploty
E2000		typ konektoru používaného pro spojování optických vláken
FC		typ konektoru používaného pro spojování optických vláken
h	[J·s]	Planckova konstanta $(6,62606891 \pm 0,00000058) \cdot 10^{-34}$ J·s
IR		infračervené záření
I_{a-s}		intenzita anti-Stokesovy části spektra
I_s		intenzita Stokesovy části spektra
k	[J/K]	Boltzmanova konstanta $1,3807 \cdot 10^{-23}$ J/K
l	[m]	délka optického vlákna
LED		Light Emitting Diodes – světlo vyzařující dioda
MM		multi mode – mnohovidové optické vlákno
n		index lomu jádra nebo pláště optického vlákna

N		polovodič typu N
NA		numerická apertura
OFDR		Optical Frequency Domain Reflectometry – metoda měření optických tras
OTDR		Optical Time Domain Reflectometry – metoda měření optických tras
P		polovodič typu P
P	[μ W]	výkon přenesený Braggovou mřížkou
PN		polovodičový přechod
R(T)	[$^{\circ}$ C]	výsledná teplota změřená metodou Ramanova zpětného rozptylu
SC		typ konektoru používaného pro spojování optických vláken
SM		single mode – jednovidové optické vlákno
T	[$^{\circ}$ C]	teplota optického vlákna nebo jeho okolí
T _n	[$^{\circ}$ C]	teplota lázně nastavené pomocí kalorimetru
ν_{vib}		vibrační frekvence
UV		ultrafialové záření
V		jednovidový režim optického vlákna
VVN		velmi vysoké napětí
z		pozice od čela optického vlákna

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Optická vlákna	4
2.1	Historie optických komunikací	5
2.2	Princip funkce optického vlákna	5
2.3	Základní typy optických vláken	8
2.3.1	Mnohovidová optická vlákna	8
2.3.2	Jednovidová optická vlákna.....	10
2.4	Základní parametry optických vláken	10
2.4.1	Šířka pásma optického vlákna	10
2.4.2	Numerická apertura – NA.....	11
2.4.3	Měrný útlum optického vlákna	11
2.4.4	Disperze optického vlákna.....	12
3	Zdroje optického záření.....	13
3.1	LED diodové zdroje záření	13
3.1.1	Princip činnosti LED diody	13
3.2	Laserové zdroje záření	14
3.2.1	Princip činnosti laseru.....	14
3.2.2	Typy laserů	15
4	Distribuované systémy měření teploty	17
5	Senzory s Braggovými mřížkami	19
5.1	Princip funkce Braggových mřížek.....	19
5.2	Typy Braggových mřížek.....	20
5.2.1	Běžný Braggův reflektor.....	20
5.2.2	Blazeovaná Braggova mřížka	21

5.2.3	Chirpovaná Braggova mřížka	22
6	Senzory využívající Ramanova jevu	23
6.1	Princip Ramanova jevu	23
7	Měření teploty Braggovými mřížkami	27
7.1	Postup měření	27
7.2	Přístroje používané při měření	28
7.3	Zapojení měřicího pracoviště	31
7.4	Měření Braggovy mřížky č. 1 – 1550,450 nm	32
7.4.1	Spektrální charakteristika měřené mřížky	32
7.4.2	Naměřené hodnoty	33
7.4.3	Grafy závislostí pro laser Noyes	34
7.4.4	Grafy závislostí pro laser Idil	35
7.5	Měření Braggovy mřížky č. 2 – 1550,465 nm	36
7.5.1	Spektrální charakteristika měřené mřížky	36
7.5.2	Naměřené hodnoty	37
7.5.3	Grafy závislostí pro laser Noyes	38
7.5.4	Grafy závislostí pro laser Idil	39
7.6	Měření Braggovy mřížky č. 3 – 1551,163 nm	40
7.6.1	Spektrální charakteristika měřené mřížky	40
7.6.2	Naměřené hodnoty	41
7.6.3	Grafy závislostí pro laser Noyes	42
7.6.4	Grafy závislostí pro laser Idil	43
7.7	Měření Braggovy mřížky č. 4 – 1310,336 nm	44
7.7.1	Spektrální charakteristika měřené mřížky	44
7.7.2	Naměřené hodnoty	45
7.7.3	Grafy závislostí pro laser Noyes	46

7.8	Měření Braggovy mřížky č. 5 – 1310,336 nm	47
7.8.1	Spektrální charakteristika měřené mřížky	47
7.8.2	Naměřené hodnoty	48
7.8.3	Grafy závislostí pro laser Noyes	49
7.9	Zhodnocení naměřených údajů	50
7.10	Stanovení teplotního a prostorového rozlišení	50
8	Měření teploty pomocí Ramanova jevu	51
8.1	Postup měření	51
8.2	Přístroje používané při měření	52
8.3	Zapojení měřicího pracoviště	53
8.4	Měření optického vlákna SG1082	55
8.4.1	Profil indexu lomu měřeného vlákna	55
8.4.2	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 25°C	56
8.4.3	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 25°C	56
8.4.4	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 30°C	57
8.4.5	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 30°C	57
8.4.6	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 40°C	58
8.4.7	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 40°C	58
8.4.8	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 50°C	59
8.4.9	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 50°C	59
8.4.10	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 60°C	60
8.4.11	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 60°C	60
8.4.12	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 70°C	61
8.4.13	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 70°C	61
8.4.14	Naměřené maximální hodnoty teploty	62
8.4.15	Graf závislostí nastavené a naměřené teploty	62

8.5	Měření optického vlákna SG1087.....	63
8.5.1	Profil indexu lomu měřeného vlákna.....	63
8.5.2	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 25°C	64
8.5.3	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 25°C	64
8.5.4	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 30°C	65
8.5.5	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 30°C	65
8.5.6	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 40°C	66
8.5.7	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 40°C	66
8.5.8	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 50°C	67
8.5.9	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 50°C	67
8.5.10	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 60°C	68
8.5.11	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 60°C	68
8.5.12	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 70°C	69
8.5.13	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 70°C	69
8.5.14	Naměřené maximální hodnoty teploty.....	70
8.5.15	Graf závislostí nastavené a naměřené teploty.....	70
8.6	Měření optického vlákna SG1097.....	71
8.6.1	Profil indexu lomu měřeného vlákna.....	71
8.6.2	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 25°C	72
8.6.3	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 25°C	72
8.6.4	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 30°C	73
8.6.5	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 30°C	73
8.6.6	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 40°C	74
8.6.7	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 40°C	74
8.6.8	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 50°C	75
8.6.9	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 50°C	75

8.6.10	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 60°C	76
8.6.11	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 60°C	76
8.6.12	Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 70°C	77
8.6.13	Graf závislostí pro nastavenou teplotu 70°C	77
8.6.14	Naměřené maximální hodnoty teploty.....	78
8.6.15	Graf závislostí nastavené a naměřené teploty	78
8.7	Zhodnocení naměřených údajů	79
8.8	Stanovení teplotního a prostorového rozlišení	79
9	Porovnání obou metod měření	80
9.1	Přesnost měření teploty	80
9.2	Opakovatelnost měření.....	81
9.3	Náročnost měření	81
9.4	Srovnání použitého technického vybavení.....	82
9.5	Srovnání ceny technického vybavení.....	82
10	Závěr	83
	Literatura	85

1 Úvod

Komunikace mezi lidmi má bohatou historii. V minulosti si lidé předávali zprávy nejčastěji ústně a později písemně zaznamenané na nejrůznější materiály od kamenných destiček, papyru, pergamenu až po papír. Přenos psaných zpráv byl uskutečňován pomocí posílů, kteří danou zprávu odvezli až k příjemci. Tento způsob komunikace byl zdoluhavý a nezdřídka kdy se stávalo, že zpráva dorazila poškozená, nečitelná, případně se ztratila úplně. Jedním ze způsobů přenosu zpráv bylo také využití světla. Přenos zpráv pomocí světla se v historii vyvíjel rozmanitým způsobem. Od dávných forem, kdy se využívalo světla ohně, záblesků od zrcadel, signalizace pomocí silných zdrojů světla až k dnešním optickým komunikačním systémům využívajících laserů a optických vláken. Komunikace pomocí optických vláken hluboce pozměnily naši planetu. V dnešní době jsou komunikační systémy využívající optická vlákna schopny přenosu informací na vzdálenosti až několika tisíc kilometrů. Pro přenos na takové vzdálenosti jsou využívány především vláknově optické spoje uložené v podmořských i podzemních kabelech. Zvláště v posledních letech zaznamenaly tyto technologie nebyvalý rozvoj. To má souvislost s prudkým rozvojem informačních a komunikačních technologií. Neustále stoupají požadavky na kvalitu služeb a jejich maximální dostupnost. Vysokorychlostní datové komunikace spojené s neustále narůstajícími požadavky na přenosovou kapacitu zásadním způsobem ovlivnily telekomunikační techniku. Optická vlákna jsou pro tyto aplikace ideálním přenosovým médiem.

Optická vlákna však nemusí sloužit jen jako přenosové médium. Nyní přináší optická vlákna revoluci i do světa senzorové techniky. Optická vlákna se dají využít jako senzory teploty, mechanického napětí, zatížení nebo tlaku. Klasický senzor je zařízení, které měří určitou fyzikální veličinu a převádí ji na signál, který může být dále zpracován. Snímačů pro měření nejrůznějších fyzikálních veličin existuje velké množství a jsou založeny na různých principech. Jednou z vlastností klasických snímačů je to, že umožňují měření vždy pouze v jednom bodě měřeného objektu. Při klasickém měření teploty na větší ploše je tedy nutné použít větší množství samostatných snímačů a tyto snímače vhodně rozmístit po měřené ploše. Optická vlákna jsou pro měření na velkých plochách a stanovení teplotní mapy ideálním nástrojem. Optické vlákno si lze totiž představit jako sériové zapojení velkého množství klasických snímačů. Jednotlivé stejně dlouhé úseky vlákna se potom chovají jako samostatné snímače. Vlákno se tedy pouze vhodně rozvine po měřené ploše a připojí k měřicímu přístroji. Při takovém měření vidí obsluha měřicího přístroje v reálném čase teplotní mapu celého

měřeného prostoru. Tohoto efektu lze ale docílit i měřením pomocí klasických snímačů. Oproti měření s využitím vláknově optických snímačů je ale toto měření pracnější na přípravu. Pomocí optických vláken zabudovaných do budov, hrází přehrad, mostů nebo tunelů lze sledovat aktuální stav staveb z hlediska zatížení nosných konstrukcí nebo teploty uvnitř staveb. Pomocí optického vlákna umístěného v tunelu se může v případě nehody a požáru přesně určit místo kde hoří. Pomocí těchto informací lze poté zvolit nejvhodnější způsob řešení vzniklé situace.

Jak jsem již naznačil, jsou vláknově optické senzory stále více se rozvíjející vědní obor. V této oblasti optoelektroniky dochází k nárůstu nových poznatků a objevuje se stále více možností, kde tyto senzory najdou využití. Ve své diplomové práci se věnuji problematice distribuovaného měření teploty pomocí nestandardních typů optických vláken. To je jedna z možných aplikací vláknově optických senzorů. Konkrétně se zabývám dvěma typy vláknově optických senzorů. Jedním z nich je senzor využívající vlákno s Braggovou mřížkou. Dalším typem senzoru, se kterým pracuji, je senzor fungující na principu Ramanova jevu. Ve své práci budu zkoumat chování jednotlivých vláknově optických senzorů při působení různých okolních teplot. Budou zde teoreticky rozebrána jednotlivá optická vlákna. Dále zde bude popsán princip funkce optických zdrojů, především laserů, používaných v senzorové oblasti optoelektroniky. V další části práce se budu zabývat principem funkce Braggových mřížek, jejich citlivostí na okolní vlivy a popíšu různé podtypy těchto mřížek. Stejným způsobem popíšu také senzory pracující na principu Ramanova jevu. Budu se také zabývat popisem jednotlivých měřících přístrojů, které budou použity při měření teploty a způsobem měření.

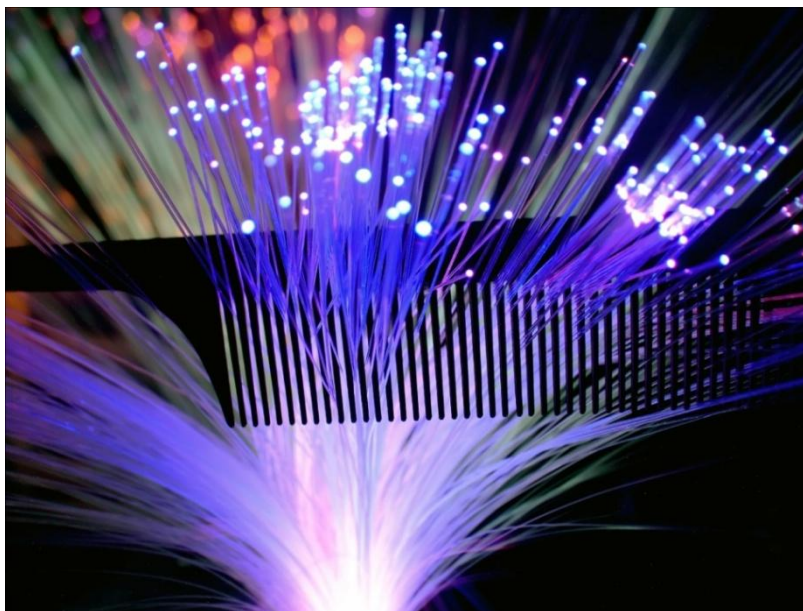
V praktické části práce budu využívat optických vláken několika typů. Pro měření teploty pomocí Braggových mřížek to bude celkem pět optických vláken s pěti různými mřížkami. Každé z vláken bude mít vypálenou Braggovu mřížku na určité vlnové délce. Dále použiji tři speciální senzorová vlákna. Těmito vlákny budu měřit teplotu okolí pomocí Ramanova jevu. Každé z těchto vláken bude proměřeno zvlášť za určitých opakovaných teplotních podmínek. Při měření bude využito většího rozsahu teplot od 25°C až do 70°C. Pro zajištění přesné teploty okolí vlákna bude použit kalorimetr. Výstupem těchto měření budou grafy zobrazující rozložení teploty v okolí vlákna. Při měření teploty pomocí Braggových mřížek budu sledovat závislost teploty na propuštěné vlnové délce a výkonu mřížkou. Při měření teploty pomocí Ramanova jevu budu sledovat teplotní rozložení v okolí dlouhého optického vlákna a zkoumat vliv ohybu vlákna na naměřenou teplotu.

V závěrečné části práce zhodnotím dosažené výsledky a budu se zabývat porovnáním jednotlivých způsobů měření teploty vláknově optickými senzory. Zvláště budu sledovat

přesnost měření teploty pomocí těchto vláknově optických senzorů. Dalším kritériem bude opakovatelnost a náročnost měření. Náročnost měření budu posuzovat z hlediska pracnosti samotného měření a také času potřebnému pro uskutečnění měření. V neposlední řadě budu porovnávat technické vybavení nutné pro uskutečnění měření.

2 Optická vlákna

Optické vlákno (obr. 1) je přenosový prostředek, v němž se pro přenos informací využívá světelných impulsů. Nejčastěji je to tenké vlákno ze skla nebo ve speciálních případech z průhledného plastu. Takové vlákno je schopné přenášet ve směru své podélné osy světelné záření a to i na značné vzdálenosti. V dnešní době jsou optická vlákna široce využívána především v telekomunikacích, kde umožňují přenos na delší vzdálenosti a při vyšších přenosových rychlostech, než jiné formy komunikace. Optická vlákna tvoří naprostou většinu dálkových telekomunikačních sítí a pravděpodobně se brzy rozšíří i do místních sítí. Optická vlákna postupně nahrazují metalická vedení, protože umožňují přenášet signály s menší ztrátou. Zároveň jsou imunní vůči elektromagnetickému rušení.



Obr. 1 Optická vlákna

Optická vlákna mohou být použita pro stavbu telekomunikačních sítí, protože jsou ohebná a mohou být svázána do svazků jako kabely. Jsou výhodná zejména na dlouhé vzdálenosti, protože světlo prochází přes vlákno s malým útlumem ve srovnání s elektrickými kabely s kovovými vodiči. Každé vlákno může přenášet mnoho nezávislých signálů, každý s použitím jiné vlnové délky světla. Vytváření sítí na krátké vzdálenosti pomocí optických kabelů, např. v budovách, šetří prostor nutný pro kabelové vedení, protože jediné vlákno může přenášet mnohem více dat než jeden elektrický kabel. Optické vlákno je také imunní vůči elektromagnetickému rušení, které představuje problém u metalického vedení. Optické kabely

nejdou elektricky vodivé, což umožňuje jejich umístění např. na sloupy vysokého napětí a kovové konstrukce náchylné na úder blesku. Mohou být také použity v prostředích, kde jsou přítomny výbušné výpary, bez nebezpečí jejich vznícení. Přestože mohou být optická vlákna vyrobena z průhledného plastu, skla, nebo kombinace obou materiálů, na velké vzdálenosti jsou u telekomunikačních aplikací vždy použita vlákna skleněná z důvodu nižších optických útlumů.

2.1 Historie optických komunikací

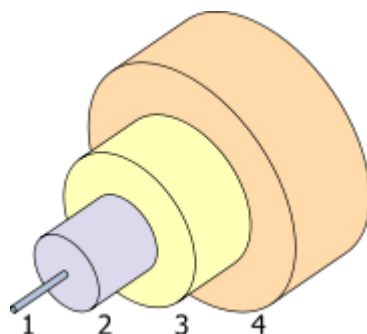
První pokusy s použitím principů, na kterých je založeno optické vlákno provedl již kolem roku 1850 John Tyndall, když předváděl vedení slunečního světla trubicí s vodou prostrčenou skrz střechní domu. Nicméně skutečná optická vlákna začala vznikat až zhruba o sto let později. První pokusy se skutečným optickým vláknem realizoval fyzik Narinder Singh Kapany v roce 1952. Vlákna blízká jejich dnešní podobě se skleněným jádrem a pláštěm ovšem vznikla ještě o pár let později. Vyvinuli je Basil Hirschowitz, C. Wilbur Peters a Lawrence E. Curtiss na Michiganské Univerzitě v roce 1956, když pomocí nich sestavili první gastroendoskop. Brzy potom již následovala celá řada dalších aplikací přenosu obrazu optickými vlákny. V roce 1956 dokázali pracovníci britské firmy Standard Telephones and Cables, že útlum v do té doby používaných vláknech je zapříčiněn nečistotami, které je možné částečně odstranit. Tvrdili, že vlákno bude možné využít v telekomunikacích, pokud se podaří jeho útlum snížit na 20 dB/km. Toho se poprvé podařilo dosáhnout v roce 1970 americké firmě Corning Inc., když předvedli vlákno s útlumem 17 dB/km, které vzniklo dopováním křemenného skla titanem. O několik let později vyrobili vlákno s útlumem 4 dB/km, jehož jádro již bylo dopováno germaniem, jako je tomu u většiny dnešních vláken. To byl zlomový okamžik, který umožnil obrovský rozmach optických vláken v telekomunikační technice. Dnešní optická vlákna dosahují s těmito historickými neporovnatelných parametrů. Jejich útlum se běžně pohybuje pod 0,2 dB/km, mají téměř nulovou disperzi a umožňují běžně překlenovat vzdálenosti do 200 km, ve speciálních případech ovšem i daleko větší. [3]

2.2 Princip funkce optického vlákna

Optické vlákno je dielektrický vlnovod, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny (zpravidla světlo či infračervené záření) podél osy vlákna. Optické vlákno se skládá z několika částí (obr. 2). Vnitřní část vlákna se nazývá jádro. Toto jádro je obklopeno pláštěm a následně primární a sekundární ochranou. Jádro slouží k vlastnímu přenosu světelného signálu. Plášť svými optickými vlastnostmi zabezpečuje správnou funkci vlákna i při měnících se podmínkách

prostředí, např. při změně vlhkosti apod. Primární ochrana slouží k ochraně optického vlákna před zničením a u skleněných vláken, které jsou velmi křehké, umožňuje jejich ohýbání. Tato ochranná vrstva je obvykle vyrobena z plastu.

U dnes používaných optických vláken sloužících pro přenos informací v datových a telekomunikačních sítích se udává průměr jádra (číslo před lomítkem) a pláště (číslo za lomítkem) v mikrometrech. Používají se mnohavidová vlákna (MM) o průměrech 50/125 μm nebo 62,5/125 μm . V telekomunikační technice se dnes používají výhradně jednovidová vlákna (SM) o průměru 9/125 μm .



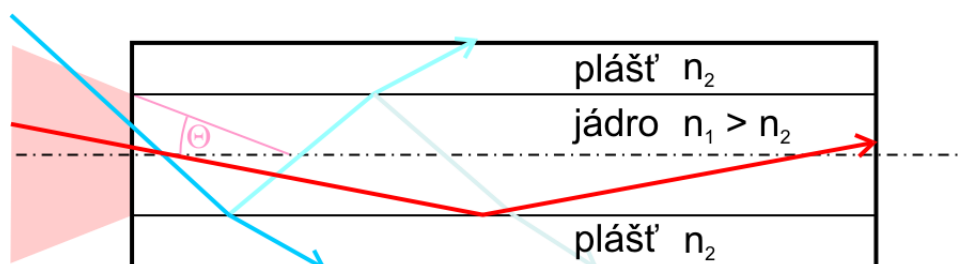
Obr. 2 Struktura optického vlákna: 1 – jádro, 2 – plášť, 3 – primární ochrana, 4 – sekundární ochrana

Základním principem popisujícím fungování optických vláken je fyzikální jev nazývaný totální odraz na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. K tomu dochází, pokud světlo prochází z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí a rozhraní mezi těmito dvěma prostředími dosáhne pod úhlem menším než je kritický úhel. V takovém případě se veškerá světelná energie odrazí zpět do opticky hustšího prostředí. V případě optického vlákna zůstane v jádru. Velikost kritického úhlu závisí na poměru indexů lomu obou prostředí. Index lomu vyjadřuje změnu rychlosti šíření světla při přechodu mezi různými prostředími. Index lomu materiálu se určí jako podíl rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v materiálu. Čím větší je index lomu, tím pomaleji se světlo pohybuje v tom daném prostředí. Sklo má index lomu výrazně vyšší než vzduch a je tedy opticky hustší. Proto už obyčejné skleněné vlákno funguje jako vlnovod, a také tak skutečně byla konstruována úplně první optická vlákna. Problém této konstrukce spočívá v tom, že je poměr indexů lomu vlákna a okolí příliš velký a mění se s měnícím se okolím vlákna (např. pokud je povrch vlákna něčím znečištěn). [3]

Proto se již od roku 1956 vyrábí všechna vlákna s jádrem s vyšším indexem lomu obklopeným pláštěm, který má nižší index lomu. Výjimku tvoří pouze některá specializovaná

detekční vlákna, u kterých je naopak žádoucí, aby se detekovaná látka přímo dotýkala jádra vlákna. Běžná hodnota indexu lomu pláště optického vlákna je 1,46. Typická hodnota indexu lomu pro jádro je 1,48. U optických vláken s třívrstvou strukturou (viz. obr. 2) může být rozhraní mezi jádrem a pláštěm buď náhlé ve vlákně se skokovým profilem indexu lomu, nebo postupné v gradientním vlákně. [3]

Na obr. 3 je znázorněn základní princip fungování optického vlákna. Jak již bylo řečeno, musí být jádro vlákna tvořeno z materiálu s vyšším indexem lomu, které obklopuje plášť z materiálu s nižším indexem lomu. Materiálem jádra a pláště je typicky velmi čisté křemenné sklo, ale existují i vlákna z průhledných plastů, nebo vlákna vyrobená kombinací skla a plastu. Aby mohlo docházet mezi jádrem a pláštěm k totálnímu odrazu, musí se paprsek světla na jejich rozhraní odrazit pod úhlem menším než kritickým. Na obr. 3 splňuje tuto podmínku červeně znázorněný paprsek. Paprsek, který dopadne na rozhraní jádra a pláště pod větším úhlem se odrazí jen částečně, zbytek energie se láme do pláště a poté z pláště ven. Proto energie odraženého paprsku slábne a během několika takových odrazů se prakticky všechna vyváže z vlákna ven. Na obr. 3 je takový paprsek znázorněn modrou barvou. [3]



Obr. 3 Základní princip fungování optického vlákna

Pro úspěšný přenos světla optickým vláknem je tedy nutné do něj navazovat paprsky pouze v rozmezí úhlů do maximálního prostorového úhlu Θ na obr. 3 znázorněném růžovým lichoběžníkem. Velikost tohoto úhlu závisí na velikosti indexů lomu okolního prostředí, jádra a pláště optického vlákna a vypočítá se podle vztahu:

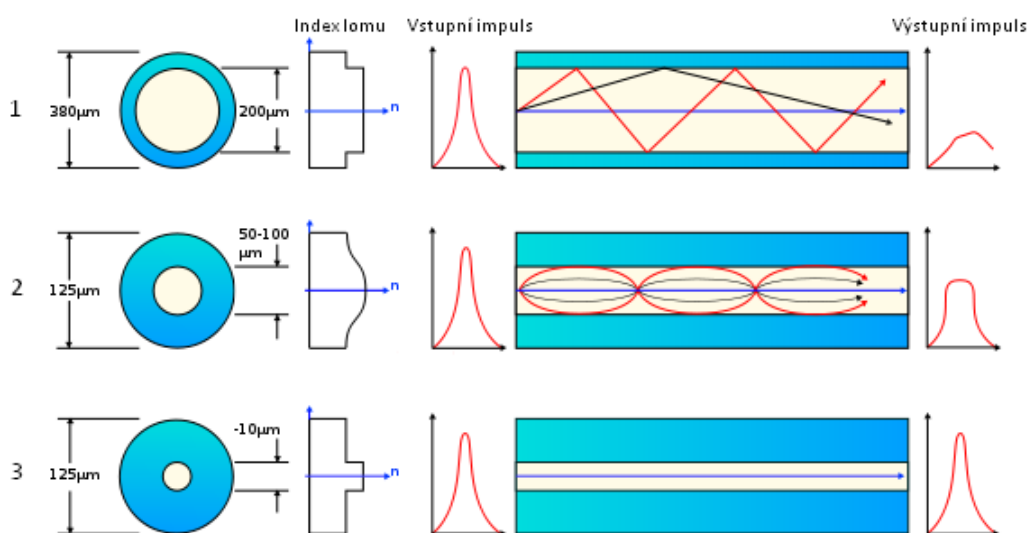
$$n \sin \Theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

Tento důležitý parametr optického vlákna nazýváme numerická apertura a značíme jej NA, potom můžeme předchozí vztah psát jako:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

2.3 Základní typy optických vláken

Z hlediska způsobu přenosu světelných paprsků dělíme optická vlákna na dva základní typy. A to na vlákna mnohovidová a jednovidová. Rozdíl mezi nimi je dán rozměry jádra, to znamená, rozměry prostředí, kterým je přenášeno optické záření. To způsobuje, že jednovidová vlákna přenášejí jeden paprsek (vid), naproti tomu mnohovidová vlákna přenášejí více paprsků (vidů). Mnohovidová vlákna můžeme dále rozdělit podle toho, jak optické vlákno vede paprsek a jak se mění jeho optické vlastnosti (konkrétně index lomu) na přechodu mezi jádrem vlákna a jeho pláštěm na vlákna se skokovou změnou indexu lomu a na vlákna s gradientní (postupnou) změnou indexu lomu. Tyto základní typy vláken znázorňuje obr. 4.



Obr. 4 Základní typy optických vláken: 1 – mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, 2 – mnohovidové gradientní vlákno, 3 – jednovidové vlákno

2.3.1 Mnohovidová optická vlákna

Mnohovidové optické vlákno (zkratka MM, anglicky multi mode) se konstrukčně liší od jednovidového vlákna podstatně větším průměrem jádra. Tyto vlákna se vyrábí jako skleněná nebo plastová s průměry jader 50 až 200 μm . Výhodou větších průměrů jádra vlákna je nižší výrobní cena, snadnější manipulace při spojování vláken, připojování světelných zdrojů apod. Optické sítě s těmito typy vláken vystačí jen s poměrně jednoduchými a levnými zdroji a detektory optického záření.

Při použití tohoto typu vlákna vysílá zdroj záření optické impulzy tvořené několika světelnými paprsky (vidy) současně. Každý z těchto vidů přitom vstupuje do optického vlákna pod poněkud jiným úhlem a také se ve vláknu odráží pod odlišným úhlem než ostatní vidy. V důsledku toho prochází celým optickým vláknem od zdroje až k detektoru po odlišné (jinak dlouhé) dráze než ostatní vidy, které byly vygenerovány společně v rámci jediného světelného impulzu. Každý světelný impulz má tedy několik složek a každá z nich putuje ke svému cíli po poněkud jiné dráze. To znamená, že každá složka záření dorazí na místo určení v jiném okamžiku než ostatní složky téhož impulzu. Detektor na cílové straně není schopen rozlišit jednotlivé samostatné složky (vidy) signálu. Vyhodnocuje pouze výsledný součet jednotlivých složek přijatého signálu. A jelikož jsou tyto složky rozptýlené v čase (dochází u nich k disperzi), výsledným efektem je zkreslení přijímaného signálu. Toto zkreslení nesmí překročit určitou maximální mez, za kterou by již přijímající strana nedokázala správně interpretovat detekovaný signál. Mnohovidová optická vlákna mohou mít jen relativně malý dosah, neboť disperze se s délkou kabelu zvětšuje, v dnešní praxi typicky 2 km. Tento typ optického vlákna je nejčastěji používán právě pro komunikaci na krátké vzdálenosti, jako např. uvnitř budovy nebo areálu. Rychlost přenosu u mnohovidových linek se pohybuje okolo 10 Mbit/s až 10 Gbit/s na vzdálenosti do 600 m což je dostatečná rychlost pro většinu místních sítí. Mnohovidová optická vlákna mohou být dvojího typu:

Vlákno s jádrem se skokovou změnou indexu lomu – Index lomu jádra má konstantní velikost n_1 , plášť má velikost indexu lomu n_2 . Na rozhraní jádra a pláště proto dochází k ostrému lomu paprsku světla (obr. 4). V důsledku toho se mnohovidovým vláknem šíří paprsky po různých drahách. Nejkratší dráhu vykoná paprsek, který má úhel odrazu na úrovni mezního úhlu (nejvyšší vid). Vzhledem k rozdílným drahám nedorazí jednotlivé paprsky na konec vlákna ve stejném časovém okamžiku, ale postupně. Přenos signálu se tedy rozprostře do delšího časového úseku, než byla jeho šířka na vstupu vlákna. Ve vlákne dochází vlivem uvedeného rozdílného šíření k jevu, který je nazýván disperze. [1]

Vlákno s jádrem s gradientní změnou indexu lomu – V jádru s postupnou změnou indexu lomu (obr. 4), dochází k plynulé změně drah paprsků. Optické záření se šíří rychleji v prostředí s nižším indexem lomu než v prostředí s vyšším indexem lomu. Proto paprsky šířící se blíže plášti, kde má index lomu menší hodnotu, mají větší rychlost a celková doba jejich šíření vláknem na velké vzdálenosti se málo liší od doby šíření přímého paprsku, který prochází středem jádra a tedy prostředím s největší hodnotou indexu lomu. Oproti vláknu se skokovou změnou indexu lomu dochází pro danou vlnovou délku k podstatnému zmenšení disperze. [1]

2.3.2 Jednovidová optická vlákna

Jednovidové optické vlákno (zkratka SM, anglicky single mode), je typ telekomunikačního vlákna používaného především pro přenos dat na velké vzdálenosti. V telekomunikacích jsou tyto vlákna jedny z nejpoužívanějších. Tyto vlákna mají menší průměr jádra (do 10 μm) než mnohovidová vlákna a šíří se jimi pouze jeden vid světla (obr. 4). Proto se u tohoto typu vláken nevyskytuje vidová disperze tak jako u mnohovidových vláken. Malý průměr jádra má za následek velký úhel odrazu ve vlákně a to vede k menšímu prodloužení dráhy paprsku. S těmito vlákny lze dosáhnout podstatně vyšších přenosových rychlostí na delších trasách oproti mnohovidovým vláknům. Nejběžnější typ jednovidového optického vlákna má průměr jádra 8 až 10 μm a je navrhován především pro užití v průmyslu, kde se využívá pro přenos dat infračervené světlo. Analýza těchto typů vláken ukazuje, že světelná energie není ve vlákně vedena pouze jádrem. Výrazný podíl přenášené energie je veden také pláštěm optického vlákna.

Jednovidové vlákno je velice podobné vláknu mnohovidovému. Liší se jen velikostí jádra, které je řádově menší než u mnohovidového vlákna. Podmínka zda bude vlákno jednovidové je určena prvním kořenem Besselovské funkce. Pro jednovidový režim optického vlákna se skokovou změnou indexu lomu musí tedy platit tento vztah:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_1 \cdot a \cdot NA \leq 2,405 \quad (3)$$

Ze vztahu plyne, že jednovidový režim se dá ovlivnit pomocí třech veličin. Je to vlnová délka λ a numerická apertura NA, avšak u těchto veličin jsme omezeni fyzikálními zákony. Dále je to průměr vlákna a , kde omezení prakticky neexistuje, protože je to pouze věc technologie výroby vlákna, která je v dnešní době velmi dobře zvládnutá.

2.4 Základní parametry optických vláken

2.4.1 Šířka pásma optického vlákna

Šířka pásma udává nejvyšší kmitočet signálu, který může být spolehlivě přenesen na vzdálenost 1 km mnohovidovým vláknem bez nadměrného zkreslení signálu působením disperze. Je udávána v MHz·km. Šířka pásma závisí na konstrukčním uspořádání, materiálu optického vlákna a na vlnové délce optického vlákna. Vlnová délka má na šířku pásma velký

vliv. Například, vlákno, které má na vlnové délce 850 nm šířku pásma 160 MHz·km, může mít na vlnové délce 1300 nm šířku pásma 500 MHz·km. [1]

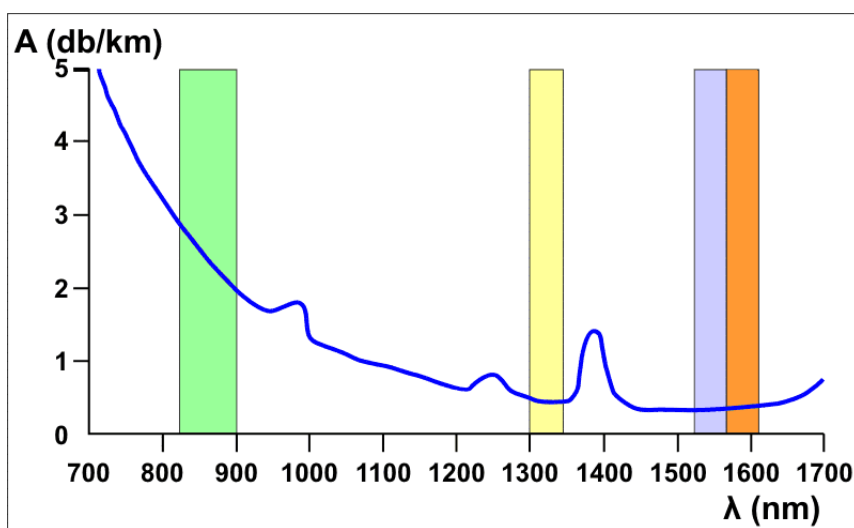
2.4.2 Numerická apertura – NA

Největší úhel, pod kterým může světelný paprsek vstupovat do optického vlákna tak, aby byl vláknem přenášen, definuje tzv. numerická apertura. Číselně je NA rovna sinu maximálního úhlu, pod kterým se vstupující paprsky budou šířit od začátku vlákna k jeho konci. Paprsky dopadající pod větším úhlem se šířit vláknem nebudou. Numerickou aperturu definuje vztah (2). [1]

2.4.3 Měrný útlum optického vlákna

S přibývajícím vzdáleností od zdroje signálu postupně klesá výkon přenášeného signálu. Veličina, která tento jev popisuje, se nazývá měrný útlum, značí se α a vyjadřuje se v dB/km. Je měřítkem ztrát optické energie ve vlákně. Technologie výroby vláken se neustále zlepšuje a tak se podařilo dosáhnout extrémně nízkých hodnot útlumu. Absolutní minimum je v oblasti vlnové délky 1550 nm a má hodnotu přibližně 0,2 dB/km. Měrný útlum vlákna je způsoben následujícími vlivy:

1. **Vlastní absorpce** – na vlastních molekulách optického materiálu, např. křemenného skla. Absorbční maxima jsou v oblasti UV (40 až 400 nm) a IR (2000 nm až 100 μ m). Z tohoto důvodu jsou optické systémy provozovány v okolí třech vlnových délek: 850 nm, 1300 nm a 1500 nm (viz. obr. 5).



Obr. 5 Křemenná okna – používané oblasti spektra jsou vyznačeny barevně

2. **Nevlastní absorpce** – absorpce světla na nečistotách (molekuly kovů, které mohou do materiálu vlákna vniknout v důsledku špatné vnější ochrany).
3. **Lineární rozptyl** – materiál jádra a pláště není ideálně homogenní. Na těchto nehomogenitách se v důsledku lomů a odrazů tříští paprsky do všech směrů a tato část energie se ztrácí. Lineární rozptyl je hlavní složkou útlumu optických vláken, jeho velikost se zvětšuje se čtvrtou mocninou vlnové délky.
4. **Nelineární rozptyl** – u části optického záření dochází ke změně jeho vlnové délky. Z hlediska pracovní vlnové délky je tato část energie ztracena.
5. **Ztráty mikroohyby** – řádově mm a menší. Jsou kritické pro jednovidová vlákna, eliminují se vhodnou konstrukcí optického kabelu.
6. **Ztráty makroohyby** – řádově desítky mm. Při montáži nesmí být překročena minimální katalogová hodnota doporučeného ohybu kabelu.

2.4.4 Disperze optického vlákna

Tento parametr charakterizuje vlákno z hlediska maximální přenosové rychlosti. Je možné ho demonstrovat na průběhu pravoúhlého impulsu podél délky vlákna. Podél trasy se mění tvar tohoto impulsu tak, že se zmenšuje jeho špičková velikost a zvětšuje se jeho šířka. Na konci trasy může být signál znehodnocen do takové míry, že je nepoužitelný. Na konci optické trasy se jednotlivé impulsy mohou prolínat, a tedy není možné rozlišit přesně stav $\log 1$ a $\log 0$.

1. U mnohovidových vláken převažuje tzv. **vidová disperze**, každý paprsek dorazí díky rozdílnosti délek drah na konec vlákna v rozdílných časových okamžicích. Impuls získaný z výkonu jednotlivých paprsků se liší od průběhu impulsů na vstupu.
2. **Chromatická disperze** – je způsobena rozdílnou rychlostí šíření dílčích složek světla (rozdílné vlnové délky). Na konci vlákna se jednotlivé složky spektra skládají s časovými rozdíly, tzn. s jiným časovým průběhem než na začátku vlákna.
3. U jednovidových vláken se projevuje **polarizační vidová disperze**. Jediný vid, šířící se jednovidovým vláknem, se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. Jakákoliv kruhová nesymetrie vlákna (ať z výroby, mikroohyby způsobenými montážemi nebo vnějším tlakem apod.) způsobí šíření obou polarizací jinou rychlostí a tedy rozšíření impulsu. Tento parametr se stává důležitým v souvislosti s růstem přenosové rychlosti nad 2,5 Gb/s. [1]

3 Zdroje optického záření

V optických komunikacích jsou zdroje záření stejně důležité jako samotná optická vlákna a jsou na ně kladeny vysoké nároky. Pro buzení optických vláken se používají jak zdroje světla nekoherentního, tak koherentního. V dnešní době se používají převážně světelné zdroje typu LED a laserové diody.

3.1 LED diodové zdroje záření

Název LED je odvozen z anglického Light Emitting Diode, což v překladu znamená dioda, která vyzařuje světlo. LED dioda je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod PN. Prochází-li přechodem PN elektrický proud v propustném směru, vyzařují (emitují) LED diody nekoherentní světlo s úzkým spektrem na určité vlnové délce. LED diody mohou emitovat jak viditelné světlo, tak i jiné druhy záření. Zdroje záření typu LED se používají převážně pro buzení mnohovidových optických vláken, která pracují s menšími přenosovými rychlostmi a na kratších vzdálenostech.

3.1.1 Princip činnosti LED diody

U LED diody je využíván princip elektroluminiscence, při které je PN přechodem vyzařováno (emitováno) optické záření. Základní princip činnosti LED diody je stejný jako u klasické usměrňovací diody. Přiložením napětí v propustném směru dochází k injekci minoritních nosičů elektrického náboje přes PN přechod. Při přechodu elektrických nábojů přes přechod PN dochází k rekombinaci elektronů s děrami na straně polovodiče typu P a díry rekombinují s elektrony na straně typu N. K rekombinaci dochází v blízkosti PN přechodu. Vlivem přiloženého elektrického pole přechází elektrony na vyšší energetickou hladinu. Každý elektron zůstane na vyšší energetické hladině po různou dobu, podle toho, jak stabilní bude jeho stav. Dříve nebo později však vyšší hladinu opustí a vyzaří světelné kvantum. Učiní tak sám od sebe, spontánně, a proto hovoříme o spontánní emisi záření. Kdy se to stane, je pro každý jednotlivý atom věcí náhody. Pravděpodobnost zářivé rekombinace roste se zvětšující se šířkou zakázaného pásu. Světelné záření opouští destičku polovodiče ve všech směrech, které jsou pro něj průhledné. Vlnová délka energie vyzařované ve formě fotonu je dána rozdílem energie nosiče elektrického náboje před a po rekombinaci (šířce zakázaného pásu). Čím větší je energie, tím má vyzařovaný světelný paprsek kratší vlnovou délku. Výběrem polovodičových materiálů

typu P a N a jejich dotování příměsemi je možné určit vlnovou délku emitovaných fotonů. V oblasti středních proudů je svítivost LED diody přímo úměrná hustotě proudu v polovodiči.

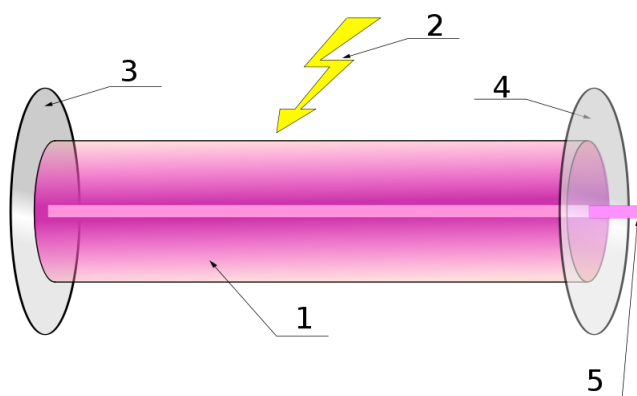
3.2 Laserové zdroje záření

Laser je zařízení určené ke generování monochromatického (jednobarevného) optického záření. Název laser je zkratka z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tj. zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření. Český výraz pro laser je kvantový generátor světla, ale tento výraz není používán. Laser je tedy optický zdroj monochromatického, koherentního (uspořádaného) elektromagnetického záření s malou divergencí (rozbíhavostí) a to nejčastěji ve viditelném spektru a v přilehlých oblastech (ultrafialová a infračervená). Světlo je z laseru vyzařováno ve formě úzkého svazku, na rozdíl od světla přirozených zdrojů je koherentní, což zjednodušeně řečeno znamená, že příslušné částice (fotony) se ve svazku pohybují jedním směrem a jejich elementární vlny mají vzájemnou fázovou souvislost. Laserový paprsek světelného záření je monochromatický, tedy jednobarevný (obsahuje jen jednu vlnovou délku světla) a má malou divergenci. První funkční laser předvedl v roce 1960 Theodore H. Maiman v USA. Jako aktivní prostředí použil krystal rubínu. Laser však mohl pracovat pouze v pulzním režimu. V komunikačních systémech si lasery našli své místo, jako zdroje pro rychlé, dálkové trasy. [1] [2]

3.2.1 Princip činnosti laseru

Laser je tvořen aktivním prostředím, rezonátorem a zdrojem energie. Aktivní prostředí je látka, ve které se atomy dostávají do vybuzeného stavu. V současné době se jako aktivní prostředí používá nepřeberné množství látek různého skupenství. Rezonátor tvoří ve většině případů optická dutina vymezená zrcadly. U laserové diody slouží jako zrcadlo samotné rozhraní aktivního prostředí se vzduchem. Základní strukturu laseru znázorňuje obr. 6. Zdrojem energie, který může představovat například výbojka, je do aktivního prostředí dodávána energie. Tato dodaná energie vybudí elektrony atomů aktivního prostředí ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny, dojde k tzv. excitaci. Takto je do vyšších energetických stavů vybudena většina elektronů atomů tvořících aktivního prostředí a vzniká tak tzv. inverze populace. Vybuzevané elektrony však na vyšší energetické hladině vydrží pouze omezenou dobu (nestabilní stav) a při následném návratu na nižší energetickou hladinu dojde k vyzáření (emisi) kvanta přebytečné energie ve formě fotonů. Tyto fotony následně interagují s dalšími elektrony inverzní populace, čímž spouštějí tzv. stimulovanou emisi fotonů, se stejnou frekvencí a fází,

jako měli původní fotony. Opakováním tohoto jevu vede postupně k zvyšování počtu fotonů v aktivním prostředí. Díky umístění aktivní části laseru do rezonátoru, tvořeného například zrcadly, dochází k odrazu svazku fotonů a jeho opětovnému průchodu prostředím. Tento proces dále podporuje stimulovanou emisi (uvolňování) fotonů, a tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Abychom získali souvislý světelný paprsek, musíme ještě prostředí vhodně vytvarovat. Výsledný světelný paprsek pak opouští tělo laseru průchodem skrze polopropustné zrcadlo. [2]



Obr. 6 Konstrukce laseru: 1 – aktivní prostředí, 2 – zdroj záření, 3 – odrazné zrcadlo, 4 – polopropustné zrcadlo, 5 – laserový paprsek

3.2.2 Typy laserů

Podle aktivního prostředí rozlišujeme tři základní typy laserů – plynové, pevnolátkové a polovodičové, známější jako laserové diody. U plynových laserů vzniká paprsek v plynném prostředí, kterým je nejčastěji argon, helium nebo neon. Světelná emise vzniká po přivedení dostatečně vysokého napětí na elektrody, umístěné uvnitř trubice s plynem. Plynové lasery pro průmyslové využití mohou dosahovat i velmi vysokých výkonů, jejich nevýhodou je nutnost složitěho chlazení i relativní nákladnost. Druhou skupinu laserů tvoří pevnolátkové lasery. Zde je aktivním prostředím pečlivě vypěstovaný homogenní krystal s příměsí cizorodé látky (např. rubínové lasery). Světelná emise vzniká vystavením krystalu silnému stálému externímu světelnému záření. Poslední a nejnovější skupinou laserů jsou polovodičové lasery, obecně známé jako laserové diody. Zde světelná emise vzniká v tenké přechodové vrstvě na hranici mezi polovodiči typu P a N. Atomy v přechodové vrstvě jsou schopny absorbovat energii z elektrického proudu procházejícího diodou a přecházet tak do vyšších energetických hladin. Při sestupu na své původní hladiny nadbytečnou energii vyzáří, obecně v podobě tepla a světla.

Použitelnost a kvalita laserové diody závisí na správném výběru materiálu obou polovodičů a na udržení přesné tloušťky přechodové vrstvy. Ta musí být totiž velmi tenká, abychom dosáhli monochromatickosti záření.

Většina laserů pracuje na jedné určité vlnové délce. Pokud chceme využívat více vlnových délek, použijeme k tomu přeladitelné lasery. V dnešní době se v telekomunikační technice používají téměř výhradně polovodičové lasery. Důvodem jsou jejich malé rozměry, hmotnost a možnost integrace s dalšími součástkami.

4 Distribuované systémy měření teploty

Distribuované systémy měření teploty jsou unikátní vláknově optické systémy, které s pomocí optického vlákna umožňují kontinuálně měřit teplotu nebo mechanické napětí podél tohoto vlákna. Tyto systémy se označují zkratkou DTS. Zkratka pochází z anglického názvu Distributed Temperature Sensing system. Optické vlákno, které využívá DTS systém, si lze představit jako několik tisíc senzorů zapojených sériově a poskytujících po zpracování, informaci o teplotním (tlakovém) profilu podél vlákna. Existuje několik typů vláknově optických senzorů využívaných při distribuovaném měření teploty. Významnou skupinu tvoří senzory pracující na principu Brillouinova a Ramanova rozptylu. Další významnou skupinou optických senzorů jsou Braggovy mřížky. V případě Braggových mřížek se pro měření teploty využívá odrazu světla od mřížky umístěné v optickém vlákně. Se změnou teploty mřížky se od sebe nepatrně vzdalují jednotlivé její odrazné plochy. Tento jev je způsoben mechanickým prodlužováním materiálu optického vlákna vlivem teploty. To má za následek změnu vlnové délky odraženého světla. Ze změny vlnové délky lze velmi přesně vyčíst také změnu teploty mřížky. Funkce měřicího systému pracujícího na principu Ramanova jevu je založena na principu optického reflektometru, tzn., že do vlákna je vyslán světelný impuls, jehož část se vlivem rozptylu ve vlákně vrací na detektor. Po oddělení složek, které jsou nositeli jiných informací, je určitá část světla využita k určení teploty. Lokalizace místa, kde ke změření teploty došlo, je stejná jako v případě reflektometru, tj. na základě informace o čase, za jaký se světlo z určitého bodu vrátilo. Podrobněji se jednotlivými typy senzorů budou zabývat následující kapitoly. DTS systém využívá veškerých předností, které nám optické vlákno nabízí. Mezi tyto výhody patří:

- odolnost vůči elektromagnetickému záření
- odolnost vůči agresivnímu prostředí (v případě použití speciálních typů kabelů)
- současné odečítání několika tisíců naměřených hodnot
- snadná instalace a téměř žádná údržba, dlouhodobé monitorování (až 30 let)
- bezpečné použití v hořlavých a výbušných prostředích
- okamžitá lokalizace změn teploty, tlaku, poruchy a událostí
- délka optického vlákna až do 10 km v případě DTS používající Ramanův rozptyl a 30km pro DTS založených na Brillouinově rozptylu
- monitorování přenosových tras z hlediska teplotní stabilizace (snížení bitové chybovosti) [4] [5]

DTS systémy měření teploty jsou velmi všestranně použitelné a je možné je nasadit například v následujících aplikacích:

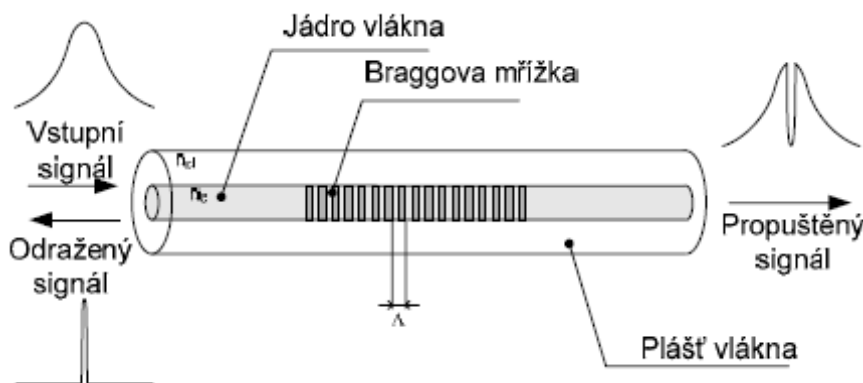
- monitorování teploty podél kabelů VVN, při těžbě a zpracování ropy, plynu a dalších hořlavých nebo výbušných látek
- monitorování teploty velkých povrchových nebo podzemních zásobníků
- systémy požární ochrany v silničních tunelech, v metru apod.
- měření teploty na produktovodech, zjišťování jejich netěsností, monitorování a řízení technologických procesů a zařízení
- monitoring a řízení teploty uvnitř velkých objektů a budov, monitorování teploty podél přehrad a hrází, zjišťování průsaků vody
- ekologické projekty (geotermální prameny, tvorba náledí, monitoring skládky či nebezpečných odpadů apod.) [4] [5]

5 Senzory s Braggovými mřížkami

Vláknové mřížky jsou pro své spektrální vlastnosti stále častěji používanými optickými prvky v telekomunikačních systémech a vláknových senzorech. Ve své nejjednodušší podobě se Braggovy mřížky skládají z periodické změny indexu lomu v jádru jednovidového optického vlákna. Tyto typy vláknových mřížek mají roviny odrazných ploch umístěny kolmo k podélné ose vlákna. Odrazné plochy mřížky, mající konstantní periodu změny indexu lomu jsou považovány za základní stavební prvky většiny Braggových mřížkových struktur. Vláknová mřížka může být vyrobena např. rytím nebo v současnosti nejpoužívanější metodou, kterou je vypálení pomocí UV laseru v průběhu tažení samotného vlákna.

5.1 Princip funkce Braggových mřížek

Braggova mřížka je tvořena periodickými změnami indexu lomu jádra vlákna. Vláknová mřížka samotná funguje jako optický filtr. Vstupující optická vlna je odražena, pokud je její vlnová délka blízká Braggově rezonanční vlnové délce, v opačném případě mřížkou prochází (obr. 7).



Obr. 7 Struktura běžné Braggovy mřížky s konstantním indexem modulace a periody

Následující rovnice popisuje vztah mezi Braggovou rezonanční vlnovou délkou a periodou mřížky:

$$\lambda_{bragg} = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (4)$$

Kde λ_{bragg} je Braggova rezonanční vlnová délka, Λ je perioda mřížky a n_{eff} je efektivní vidový index (reprezentuje hodnotu indexu lomu, po kterém se šíří daný vid a je dán rozměry a indexy lomu jádra a pláště vlákna). Světlo vedené podél jádra optického vlákna bude rozptýleno

každou mřížkovou rovinou. Nebude-li Braggova podmínka splněna, odražené světlo z každé následující roviny se postupně dostává mimo fázi a zaniká. Světlo, které není v souladu s Braggovou vlnovou rezonancí, tedy zaznamená velmi slabý odraz v každé mřížkové rovině. Tam, kde je Braggova podmínka splněna, se dávky odraženého světla z každé mřížkové roviny doplňují ve zpětném směru a formují vrchol s centrem ve vlnové délce definované parametry mřížky (viz. obr. 7).

Braggova rezonanční vlnová délka, která představuje střední vlnovou délkou zpětně odraženého světla od Braggovy mřížky, závisí na efektivním indexu lomu jádra a pravidelnosti mřížky. Efektivní index lomu stejně jako pravidelné rozestupy mezi mřížkovými plochami lze ovlivnit změnami mechanického napětí a teploty. Pokud je Braggova mřížka zahřívána mění se rozestupy mezi jednotlivými mřížkovými plochami. Změnu rozestupu způsobuje deformace (prodlužování) materiálu mřížky vlivem zvyšující se teploty. Díky tomu se také mění Braggova rezonanční vlnová délka která je odražena mřížkou. Ze změny vlnové délky odraženého světla se poté určuje teplota mřížky.

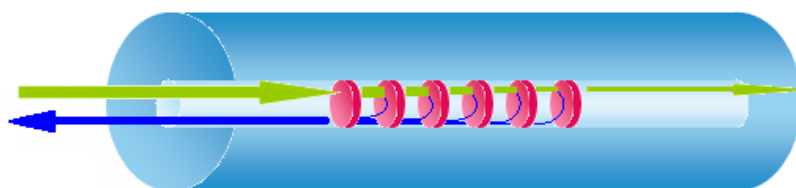
5.2 Typy Braggových mřížek

Existuje několik základních typů struktur Braggových vláknových mřížek. Jsou to běžný Braggův reflektor, blazeovaná Braggova mřížka a chirpovaná mřížka. Tyto mřížky se odlišují buď velikostí mřížkové rozteče (rozestupu mezi mřížkovými plochami) nebo odklonem odrazných ploch mřížky od podélné osy vlákna. Nejběžnějším typem je Braggův reflektor, který má konstantní rozteč odrazných ploch. Blazeovaná Braggova mřížka má plochy mřížky odkloněny oproti ose vlákna, tj. úhel mezi mřížkovými rovinami a osou vlákna je menší než 90° . Chirpovaná mřížka má neperiodickou rozteč ploch mřížky. Tato neperiodicita spočívá v monotónním zvyšování rozestupu mezi mřížkovými plochami.

5.2.1 Běžný Braggův reflektor

Běžný Braggův reflektor který má konstantní rozestupy mezi plochami je nejjednodušší a nejpoužívanější vláknová mřížka. Tento typ vláknové mřížky je zobrazen na obr. 8. Braggův reflektor může, v závislosti na parametrech jako je délka mřížky a velikost indexu lomu odrazných ploch, fungovat ve dvou režimech. Jako úzkopásmový přenosový nebo odrazový filtr nebo jako širokopásmové zrcadlo. V kombinaci s ostatními typy Braggových reflektorů mohou tyto mřížky fungovat jako pásmové propusti. Braggovy reflektory jsou považovány za velmi dobré napěťové a teplotní indikátory. Měření teploty pomocí těchto

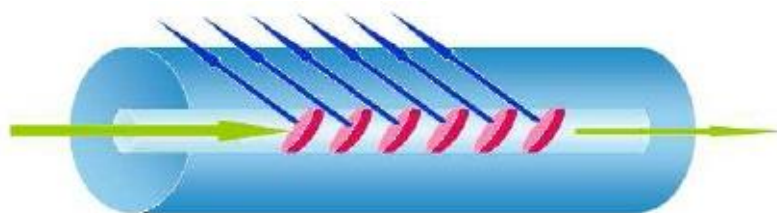
vláknových mřížek probíhá na principu sledování změny vlnové délky světla odraženého mřížkou v závislosti na změně měřené veličiny (teploty). Tento způsob měření eliminuje problémy s amplitudou nebo kolísáním, které existují u mnoha jiných typů senzorů. Každému Braggovu reflektoru může být přiřazena jeho vlastní pracovní vlnová délka. Proto může být série různých mřížek umístěna ve stejném vlákne a každá bude mít svoji jedinečnou Braggovu rezonanční vlnovou délku. Tyto typy mřížek se také ukazují jako velmi užitečné komponenty laditelných vláken nebo polovodičových laserů.



Obr. 8 Struktura běžného Braggova reflektoru [8]

5.2.2 Blazeovaná Braggova mřížka

Blazeovaná (klopená) Braggova mřížka má čelo odrazných ploch šikmo skloněno vůči vláknovým osám (viz. obr. 9). Což znamená, že úhel mezi mřížkovými plochami a vláknovou osou je menší než 90° . Výsledkem naklonění mřížkových rovin k vláknovým osám je světlo, které je vedeno jádrem vlákna jiným způsobem než v případě běžného Braggova reflektoru. Toto světlo je částečně propuštěno mřížkou a částečně vyzářeno z jádra do pláště optického vlákna. Světlo vedené mřížkou je tedy zdvojené, nepevně ohnuté a šíří se v plášti vlákna nebo v radiálním vidu. Sklon mřížkových ploch a intenzita indexu modulace určuje účinnost vazby a šířku pásma světla, které je vypuštěné ven. Kriterium k naplnění Braggovy podmínky blazeované mřížky je podobné kritériu Braggova reflektoru.



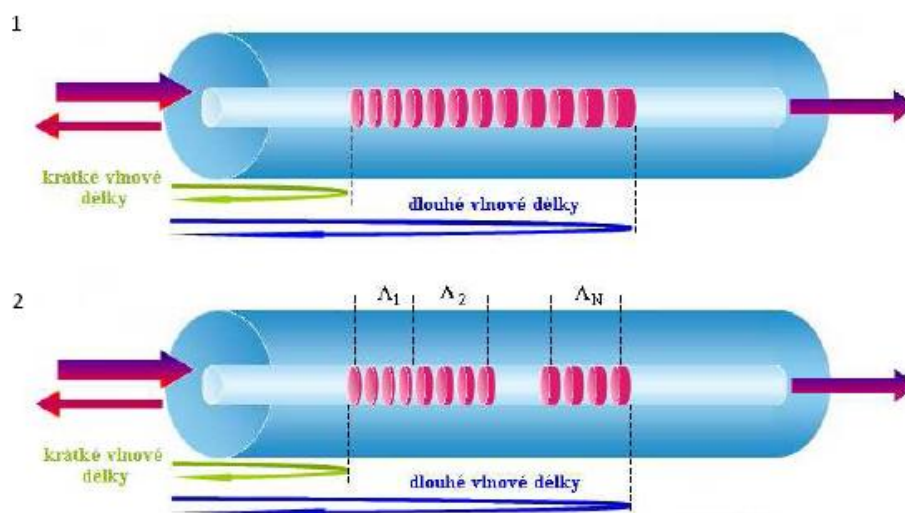
Obr. 9 Struktura blazeované Braggovy mřížky [8]

Tyto typy mřížek se používají např. jako erbiem dotované vláknové zesilovače, které se používají v oblastech širokopásmového zesílení a jsou dnes nedílnou součástí dálkových vysokorychlostních komunikačních systémů. Systém zesiluje několik signálů na různých

vlnových délkách a dává homogenní poměr signálu a šumu na výstupu zesilovače. Další zajímavou aplikací tohoto typu mřížek je vidová konverze.

5.2.3 Chirpovaná Braggova mřížka

Tento typ mřížky představuje jednu z nejzajímavějších Braggových mřížkových struktur s okamžitou aplikací v telekomunikacích. Česky se jí také říká rozmítaná mřížka. Tyto mřížky mají monotónně se měnící periodu, jak je vidět na obr. 10. Parametry charakteristické pro monotónně se měnící periodu mřížek jsou považované za výhodné pro různé aplikace v telekomunikační a senzorové technice. Tyto typy mřížek mohou být realizovány axiálním střídáním buď periody mřížky Λ nebo indexu lomu jádra nebo obojího.



Obr. 10 Základní schéma chirpované mřížky s plynule se měnící periodou mřížek (1) a základní schéma kaskád několika mřížek s rostoucí periodou (2) [8]

Nejjednodušším typem chirpované mřížkové struktury je ta, kde je změna mřížkové periody lineární. Další chirpovaná mřížková struktura je vyrobena ze skupiny menších úseků stejných periodicky se zvyšujících Braggových mřížek. Je-li taková mřížková struktura správně navržena, lze ji využít k realizaci širokopásmového reflektoru. Příkladem může být chirpovaná mřížková struktura délky 2 cm která má počáteční vlnovou délku 1550 nm a tzv. chirpovanou hodnotu 1 nm/cm. To znamená, že konec takové mřížky bude mít periodu vlnové délky odpovídající 1552 nm.

6 Senzory využívající Ramanova jevu

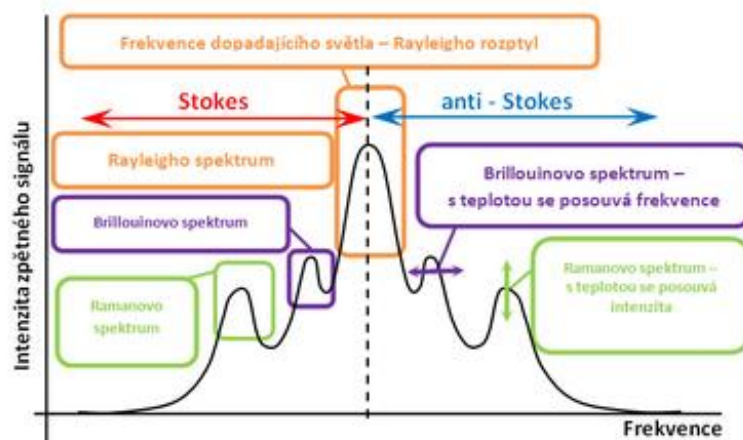
Technologicky jsou tyto vláknově optické distribuované systémy založeny na principu optického reflektometru. Při měření je do optického vlákna vyslán světelný impuls o určité vlnové délce, výkonu a délce, jehož určitá část se vlivem nelineárního (nepružného) rozptylu v optickém vlákně vrací zpět na detektor systému DTS. U těchto systémů je pro měření nejčastěji využito optické reflektometrie v časové oblasti OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) nebo ve frekvenční oblasti OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry). Jevy nelineární (nepružné) způsobující návrat části světelného impulsu na detektor se nazývají stimulovaný Ramanův a Brillouinův rozptyl. DTS systémy se proto dělí dle konstrukce a v závislosti na použitém druhu rozptylu, který potřebují ke své činnosti. DTS systémy detekující Ramanův stimulovaný rozptyl využívají mnohovidového optického vlákna (průměr jádra 50 μm a průměr pláště 125 μm , ale dá se použít i vlákno s průměrem jádra 62,5 μm a pláště 125 μm) s velkou hodnotou numerické apertury pro maximalizování vedené intenzity zpětně odraženého světla, protože ta je při Ramanově rozptylu poměrně malá. Relativně vyšší útlumová charakteristika mnohovidového vlákna pak omezuje dosah DTS systémů založených na Ramanově rozptylu na přibližně 8 až 10 km. Naproti tomu DTS systémy detekující Brillouinův rozptyl využívají jednovidového optického vlákna (průměr jádra 9 μm a průměr pláště 125 μm) a jsou schopny měřit teplotu i tlak do vzdálenosti až 30 km. Prostorová rozlišitelnost DTS systémů je standardně 1 m s přesností $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, při rozlišení 0,01 $^{\circ}\text{C}$. Pro extrémní DTS systémy je prostorová rozlišitelnost 0,5 m a teplotní 0,05 $^{\circ}\text{C}$. Jedná se tedy o velice přesné a precizní měřicí systémy. Nicméně před každým měřením je nutné nastavit integrační dobu, po kterou se bude provádět měření a počet iterací. Platí jednoduché pravidlo, čím je delší integrační doba a počet iterací, tím dochází k většímu zpřesnění a vyhlazení teplotní křivky. [6]

6.1 Princip Ramanova jevu

Ke vzniku rozptylu záření dochází z důvodu průchodu záření prostředím. K rozptylu záření může dojít na malých tuhých částech hmoty nebo na molekulách látky. Při rozptylu záření na molekulách má převážná část rozptýleného záření stejnou vlnovou délku jako záření původní (elastický neboli Rayleighův rozptyl). U malé části rozptýleného záření však dochází ke změně vlnové délky oproti původnímu budícímu záření (vzniká Ramanův či též kombinační rozptyl). Tento jev byl předpovězen rakouským vědcem Smekalem již v roce 1923 a teoreticky se jím zabývali v letech 1925 – 1927 vědci Heisenberg, Dirac, Kramers či Schrödinger. V roce

1928 jej experimentálně prokázal při studiu rozptylu světla indický vědec Chandrasekhara Venkata Raman, po němž byl jev pojmenován a jenž za tento objev obdržel v roce 1930 Nobelovu cenu za fyziku. Ve stejném roce jako Raman popsali změnu vlnové délky rozptýleného záření při studiu chování světla v krystalech i sovětsí badatelé Landsberg a Mandelštam, kteří tento jev nazvali kombinační rozptyl světla. [6] [10]

Ramanův jev byl pro senzorové aplikace poprvé použit v 80-tých letech dvacátého století. Tento rozptylový jev je spojený s posuny vlnových délek na nehomogenitách v křemenném skle. Vznik Ramanova rozptylového světla je způsoben teplotně ovlivněnými vibracemi molekul. Následkem toho zpětně rozptýlené světlo nese informaci o lokální teplotě z místa rozptylu. Ve skutečnosti má Ramanovo zpětně rozptýlené světlo dvě frekvenčně posunuté složky Stokesovskou a Anti-Stokesovskou. Amplituda Anti-Stokesovské složky je silně teplotně závislá, zatímco amplituda Stokesovské složky nikoliv (obr. 11). Proto senzorové měření založené na Ramanově jevu vyžaduje filtraci k oddělení důležitých frekvenčních složek. V těchto složkách spočívá záznam o vztahu mezi Anti-Stokesovskou amplitudou a Stokesovskou amplitudou, který obsahuje teplotní informaci. [6] [9] [10]



Obr. 11 Ramanovo spektrum rozptýleného záření [6]

K rozptylu záření na molekulách dochází v okamžiku, kdy se foton vstupujícího záření srazí s molekulou zkoumané látky. Přibližně tisícina (10^{-3}) zářivého toku vstupujícího (budícího) záření se podílí na pružných srážkách fotonů budícího záření s molekulami zkoumané látky. Podstatně menší část budícího záření (cca 10^{-8}) se účastní nepružných srážek fotonů s molekulami. Dojde-li k nepružné srážce, předá dopadající foton část své energie molekule nebo od ní určité kvantum energie přijme. Takto vzniklé rozptýlené záření bude mít rozdílnou frekvenci od záření budícího. Tento jev se nazývá Ramanův rozptyl. [6] [10]

Při nep pružných srážkách fotonů a molekul se nemění kinetická energie, ale pouze vnitřní energie zúčastněných molekul. Výsledkem změny vnitřní energie molekuly je její přechod z nižšího do vyššího vibračního (přesněji vibračně-rotálního) stavu nebo její přechod z vyššího vibračního stavu do nižšího. Rozdíl mezi frekvencemi fotonu před a po srážce (tzn. rozdíl frekvencí budícího a rozptýleného záření) se označuje jako Ramanův posun a odpovídá frekvenci příslušného pásu v Ramanově spektru (obr. 11). Aby bylo možné dokonale zaznamenat změnu frekvence rozptýleného záření je zapotřebí používat pro buzení Ramanova rozptylu záření monochromatické. Při neelastické (nep pružné) srážce fotonu budícího záření s molekulou může dojít ke snížení i k zvýšení energie fotonu. V případě snížení energie fotonu, předá foton určité kvantum své energie molekule. Jedná se přesně o takové kvantum, které umožní molekule přejít do vyššího vibračního stavu. Foton má po srážce nižší energii a tedy i nižší frekvenci. Příslušný pás bude v Ramanově spektru posunut od pásu budícího záření směrem k nižším energiím do tzv. Stokesovy oblasti. Jedná se o posun směrem k nižším frekvencím neboli k větším vlnovým délkám. Foton záření se srazí s molekulou. Během srážky se molekula dostane na virtuální excitovanou vibrační energetickou hladinu a poté klesne na vibračně energetickou hladinu, která je vyšší než hladina základní. Molekula tedy zůstane po srážce s fotonem v excitovaném vibračním stavu. Energie nutná k udržení molekuly v excitovaném stavu, je odebrána fotonu. Ten má proto po srážce nižší energii (frekvenci) než před srážkou. V případě zvýšení energie fotonu získá foton energii od molekuly. Velikost obdržené energie je totožná s energetickým kvantem, které molekula uvolní při přechodu z vyšší na nižší vibračně-rotální energetickou hladinu. Foton má po srážce vyšší energii a tedy i vyšší frekvenci. Příslušný pás bude v Ramanově spektru posunut od pásu budícího záření směrem k vyšším energiím do tzv. anti-Stokesovy oblasti. Jedná se o posun směrem k vyšším frekvencím neboli k menším vlnovým délkám. [6] [10]

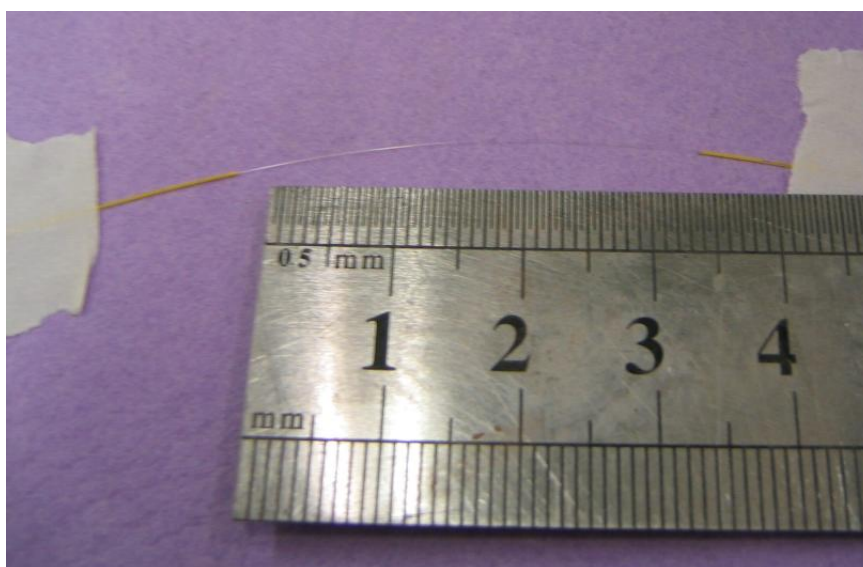
Pro vláknově optické distribuované systémy, které využívají pro svoji funkci Ramanova zpětného rozptylu, je nejdůležitější anti-Stokesova část spektra. Anti-Stokesova část spektra mění velikost své intenzity na základě změny teploty podél optického vlákna viz. obr. 11. Stokesova část spektra je teplotně nezávislá. DTS systémy proto principiálně pracují na základě změny intenzity anti-Stokesovy části spektra vůči Stokesově části spektra. Tuto změnu lze popsat následujícím vztahem:

$$R(T) = \frac{I_{a-s}}{I_s} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{a-s}} \right)^4 \exp\left(-\frac{h \cdot c \cdot \nu_{vib}}{k \cdot T} \right) \exp(-\Delta\alpha \cdot z) \quad (5)$$

Kde $R(T)$ je výsledná teplota, I_{a-s} je intenzita anti-Stokesovy části spektra, I_s je intenzita Stokesovy části spektra, λ_s je Stokesova vlnová délka, λ_{a-s} je anti-Stokesova vlnová délka, h je Planckova konstanta $(6,62606891 \pm 0,00000058) \cdot 10^{-34}$ J·s, c je rychlost světla ve vakuu, ν_{vib} je vibrační frekvence, k je Boltzmanova konstanta $1,3807 \cdot 10^{-23}$ J/K, T je termodynamická teplota, $\Delta\alpha$ optický útlum mezi Stokesovou a anti-Stokesovou částí spektra, z je pozice od čela optického vlákna. [6]

7 Měření teploty Braggovými mřížkami

Braggovy mřížky (obr. 12) se do optických vláken vypalují UV laserem při výrobě samotných vláken. Tyto mřížky pracují na určitých vlnových délkách. Těmto vlnovým délkám se říká Braggova vlnová délka (viz. kapitola 7.4). Pro měření teploty bylo vybráno celkem pět optických vláken s pěti různými Braggovými mřížkami. Braggovy vlnové délky měřených mřížek jsou u prvních třech vláken 1550,450 nm další 1550,465 nm a 1551,163 nm. Poslední dvě mřížky pracují na stejné vlnové délce 1310,336 nm. V každém vlákně je tedy jedna Braggova mřížka. Optická vlákna mají v úseku s mřížkou pouze primární ochranu. Jsou tedy velmi křehká a je potřeba s nimi manipulovat velmi opatrně.



Obr. 12 Optické vlákno s Braggovou mřížkou

7.1 Postup měření

Měřením je zkoumána závislost teploty v okolí Braggovy mřížky na výkonu a mřížkou propuštěné vlnové délce. Jako počáteční teplotu měření jsem zvolil 25°C a dále jsem teplotu zvyšoval po pěti stupních až do konečné teploty 70°C. Všechny naměřené hodnoty jsem zaznamenal do tabulek a vynesl do grafů. Bylo proměřeno celkem pět Braggových mřížek. Při měření jsem používal dva typy laserů. Jedním z nich byl širokospektrální laser Noyes a dále úzkospektrální laser Idil. Tyto optické zdroje jsou popsány podrobněji v kapitole 7.2. Širokospektrální laser není pro tento typ měření příliš vhodný. Při měření se obtížně odečítaly naměřené hodnoty, protože ve spektru laseru se vyskytuje více vidů záření. Určité obtíže

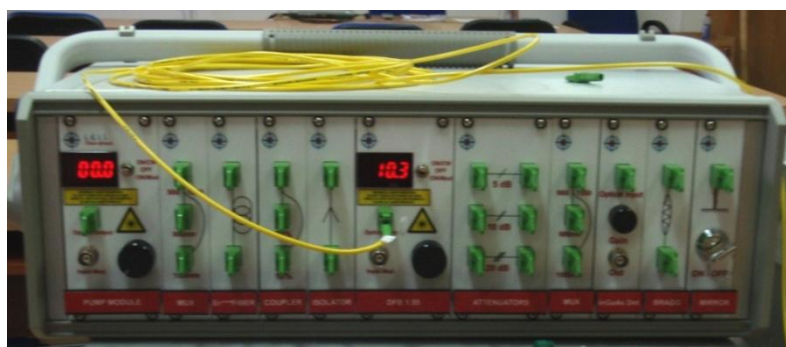
způsobovalo také to, že laser byl značně nestabilní. Při použití laseru Idil tento problém odpadl, protože tento laser má ve svém spektru pouze jeden vyzařovaný vid.

7.2 Přístroje používané při měření

Pro měření bylo využito zdrojů optického záření, které se běžně využívají pro laboratorní měření ve výuce. Při měření bylo využito dvou zdrojů optického signálu. Jedná se o přístroj Noyes OLS2 dual (obr. 13) u kterého lze zvolit, jakou vlnovou délku má mít vyzařované optické záření. Navolit můžeme vlnovou délku 1310 nm nebo 1550 nm. Druhým použitým zdrojem optického záření je přístroj Idil (obr. 14) pracující na vlnové délce 1550 nm. Tento optický zdroj je součástí většího bloku přístrojů.



Obr. 13 Zdroj optického záření Noyes OLS2 dual



Obr. 14 Zdroj optického záření Idil

Pro nastavení a změnu teploty v okolí Braggovy mřížky byl použit přístroj od firmy Memmert (obr. 15). Jedná se o kalorimetr, který může obsahovat olejovou nebo vodní lázeň. Pro samotné měření byla využita olejová lázeň. Do nádrže s olejem bylo potřeba umístit další

nádobku, ve které byla vložena část optického vlákna s vypálenou Braggovou mřížkou. Nádobka musela dobře vést teplo a zároveň nepropustit kapalinu lázně. Dále je vhodné, aby byla krabička uzavíratelná, z důvodu zabránění únikům tepla. Pro měření byla zvolena krabička z ocelového plechu s víkem ze stejného materiálu. Toto opatření bylo provedeno z důvodu ochrany Braggových mřížek před vlhkostí. Ty jsou totiž velmi citlivé na jakoukoliv vlhkost, která by mohla nepříznivě ovlivnit měření.



Obr. 15 Kalorimetr Memmert

Kalorimetr indikuje nastavenou a skutečnou teplotu na displeji. Hodnota teploty je však pouze orientační. Pro přesné zjištění nastavené teploty olejové lázně jsem použil laboratorní teploměr Testo 720 (obr. 16). Tento teploměr je jednobodový přístroj určený pro měření v laboratořích a průmyslu. Jeho výhodou je možnost připojení různých měřicích sond, podle typu měřené látky. Sonda, která byla při měření použita, je ponorná a je vybavena ochranou skleněnou vrstvou. Lze ji tedy použít i v agresivních prostředích.



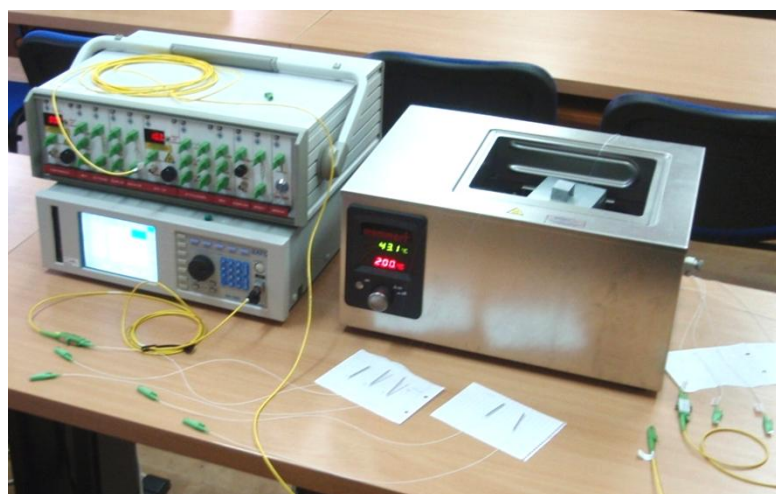
Obr. 16 Laboratorní teploměr Testo 720

Poslední a nejdůležitější součástí měřicího pracoviště je přístroj WA-7600 (obr. 17) který slouží pro měření spektra optického záření a přeneseného výkonu. Přístroj je zapojen tak že na jeho výstupu (displeji) vidíme tu část spektra, která je Braggovou mřížkou propuštěna.



Obr. 17 Spektrometr Exfo WA-7600

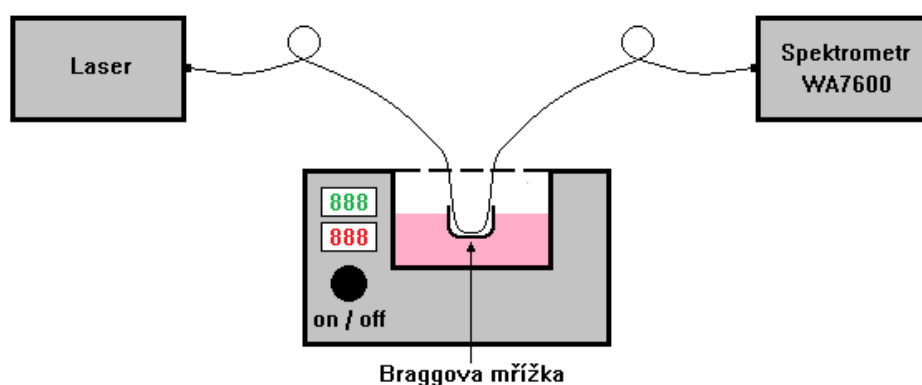
Spektrometr WA-7600 využívá Michelsonova interferometru ke generování interferenčních proužků ze vstupního záření. Paprsek vstupující do přístroje je svazkován. Po svazkování je paprsek směřován do Michelsonova interferometru. Na děliči paprsků je vstupní paprsek rozdělen do dvou paprsků, které postupují oddělenou optickou cestou. Jeden paprsek se odráží od pohybujícího se zrcadla a vrací se k děliči paprsků. Druhý paprsek se odráží od pevného zrcadla a vrací se také k děliči paprsků, kde interferuje s prvním paprskem. Intenzita světla dopadající na fotodetektor závisí na rozdílu trajektorií optických drah. Podle intenzity dopadajícího světla nastane konstruktivní nebo destruktivní interference na děliči paprsků. Jak se zrcadlo pohybuje tam a zpět, tak se sinusově mění detekovaná intenzita každé vlnové délky vstupního paprsku. Je-li dráhový rozdíl mezi trajektoriemi obou paprsků větší než vlnová délka, započítávají se příspěvky všech vlnových délek. [7]



Obr. 18 Měřicí pracoviště pro měření teploty pomocí Braggových mřížek

7.3 Zapojení měřicího pracoviště

Měřicí pracoviště jsem sestavil z přístrojů popsaných v kapitole 7.2. Přístroje jsem zapojil podle schéma zobrazeného na obr. 19. Sestava měřicích přístrojů, které jsem při měření využil je zobrazena na obr. 18. Vlákná s Braggovou mřížkou jsou vybaveny konektory typu E2000. Těmito konektory je vybaven také zdroj Idil. Ostatní přístroje mají konektory typu FC, proto bylo nutné použít redukce. Část optického vlákna, která obsahuje Braggovu mřížku jsem vložil do plechové krabičky a tuto následně vložil do olejové lázně. Do krabičky jsem současně vložil všech pět měřených Braggových mřížek. Měření každého vlákna zvlášť by bylo velmi časově náročné z důvodu dlouhé doby chladnutí olejové lázně. V průběhu měření jsem jednotlivá vlákna s Braggovými mřížkami přepojoval. Pro měření každého vlákna byly využity oba zdroje optického záření (Noyes a Idil). Použití jednotlivých zdrojů se řídí podle toho, na jaké vlnové délce jednotlivé mřížky pracují. Na konec měřeného vlákna byl připojen spektrometr WA-7600 který zobrazoval naměřené hodnoty vlnové délky a výkonu.



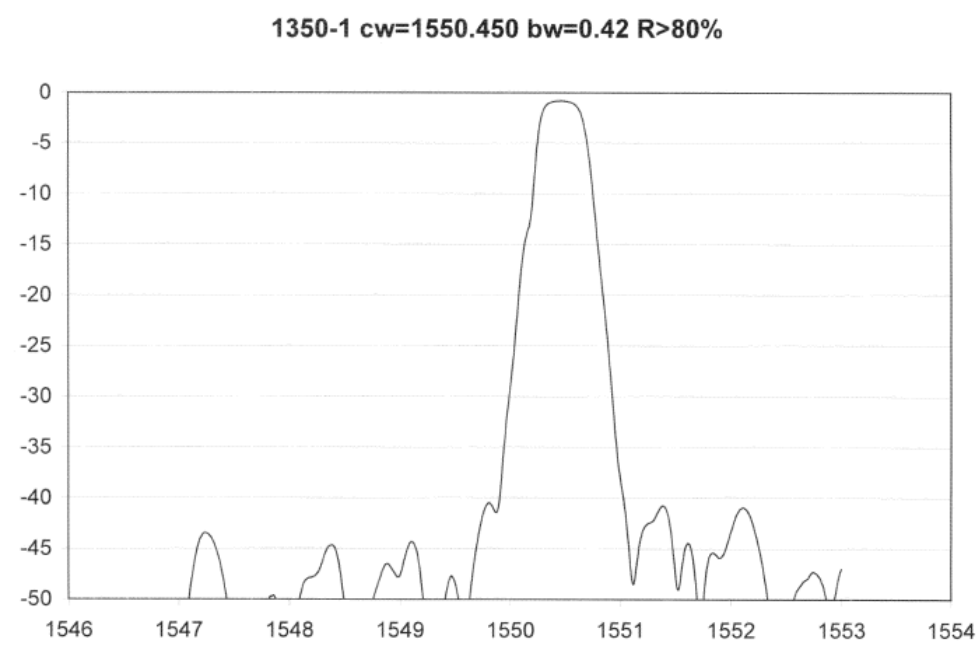
Obr. 19 Schéma zapojení měřicího pracoviště

7.4 Měření Braggovy mřížky č. 1 – 1550,450 nm

Katalogové označení měřené mřížky je 1350-1 $\lambda_c=1550,450$ $\Delta\lambda=0,42$ $R>80\%$. Spektrální charakteristiku mřížky zobrazuje obr. 20. Při měření této Braggovy mřížky jsem použil zdroj Noyes pracující na vlnové délce 1550 nm a zdroj Idil pracující na stejné vlnové délce. Měřicí pracoviště bylo zapojeno podle popisu v kapitole 7.3. Při měření jsem postupoval tak jak je popsáno v kapitole 7.1 a využil při něm všechny přístroje popsané v kapitole 7.2. Naměřené hodnoty jsem rozdělil podle použitého optického zdroje. Tyto hodnoty jsem zaznamenal do tabulek tab. 1 a tab. 2 a vynesl do grafů.

7.4.1 Spektrální charakteristika měřené mřížky

Spektrální charakteristika nám ukazuje, na jaké Braggově vlnové délce pracuje měřená mřížka. V grafu je tato vlnová délka znázorněna výrazným impulzem.



Obr. 20 Spektrální charakteristika Braggovy mřížky č. 1 – 1550,450 nm

7.4.2 Naměřené hodnoty

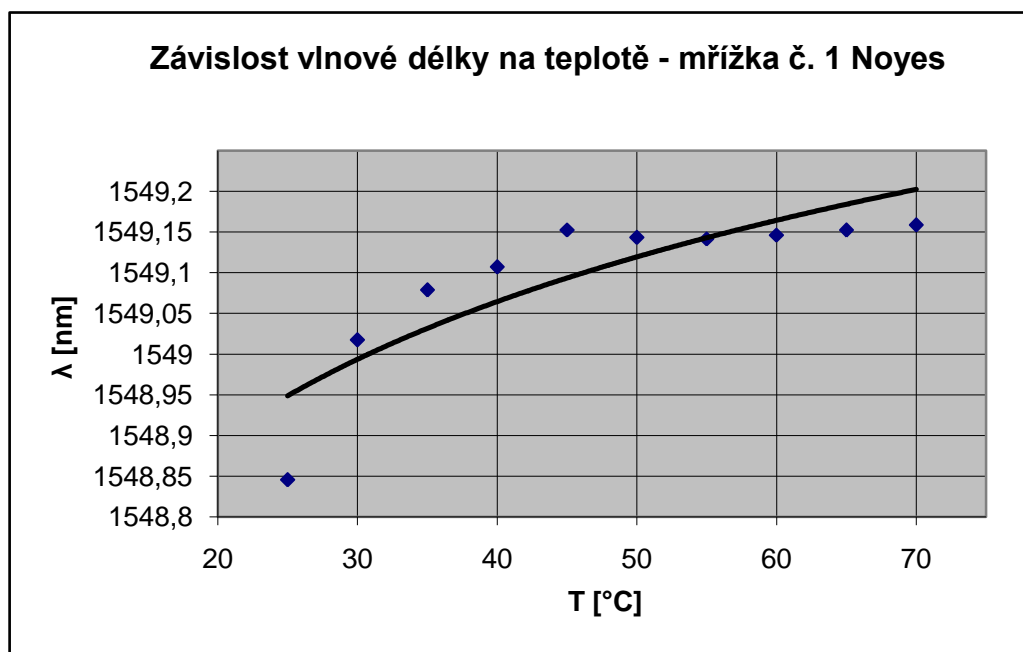
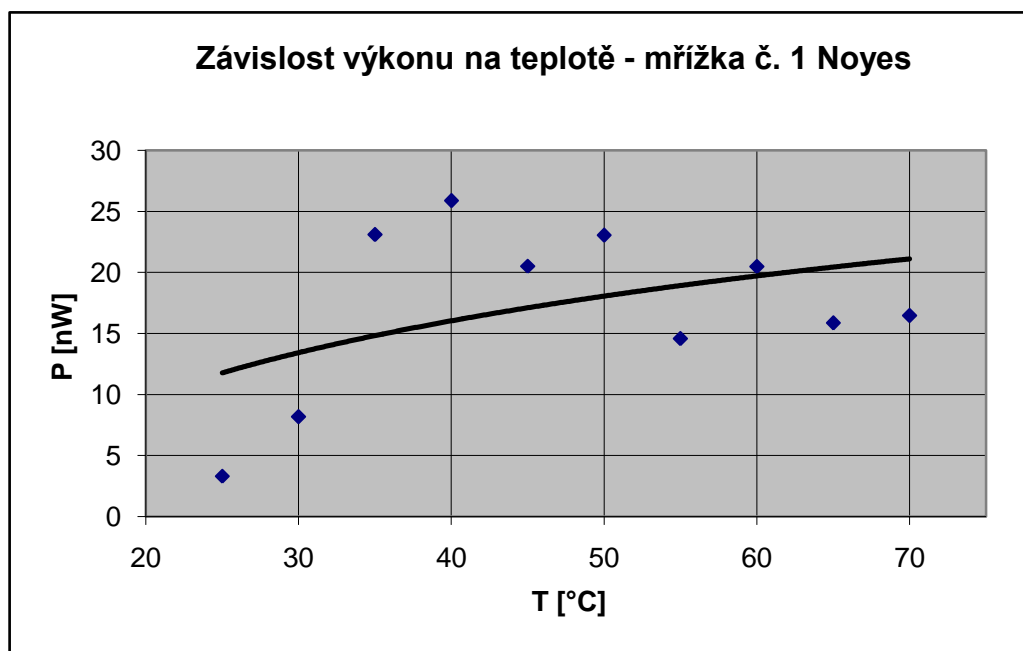
Teplota vlákna T [°C]	Přenesený výkon P [μW]	Vlnová délka λ [nm]
25	3,314	1548,8456
30	8,184	1549,0176
35	23,107	1549,0789
40	25,888	1549,1071
45	20,516	1549,1527
50	23,043	1549,1434
55	14,577	1549,1416
60	20,483	1549,1464
65	15,865	1549,1524
70	16,466	1549,1588

Tab. 1 Naměřené hodnoty výkonu a vlnové délky – zdroj Noyes, mřížka č. 1, 1550,450 nm

Teplota vlákna T [°C]	Přenesený výkon P [μW]	Vlnová délka λ [nm]
25	2,559	1548,2542
30	0,418	1548,6041
35	0,209	1548,7184
40	0,139	1548,7663
45	0,324	1548,7933
50	0,221	1548,8084
55	0,245	1548,8033
60	0,138	1548,8191
65	0,186	1548,8262
70	0,170	1548,8451

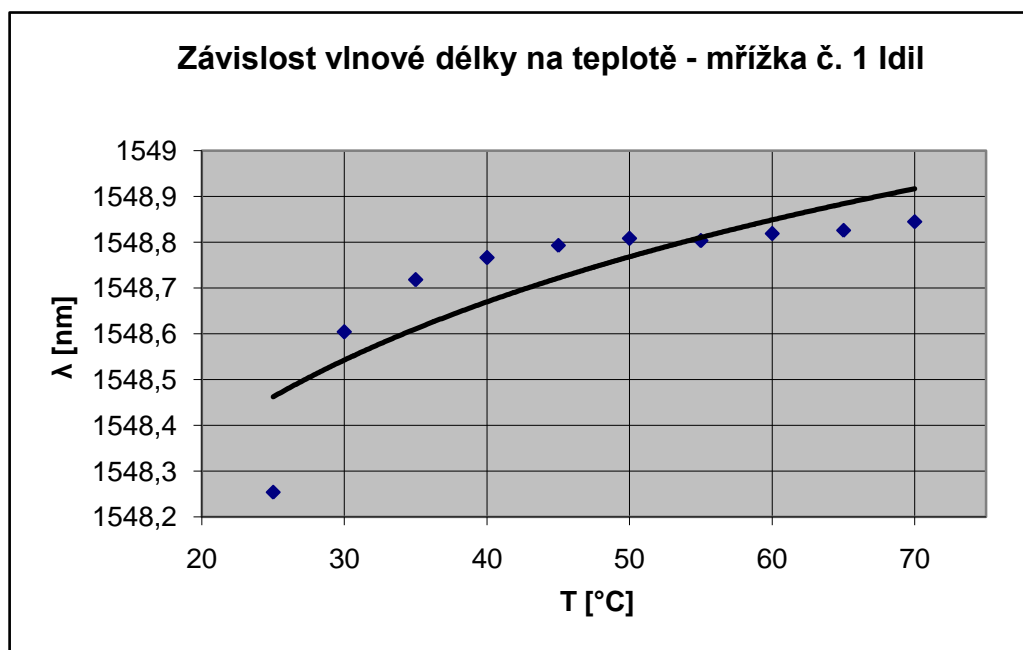
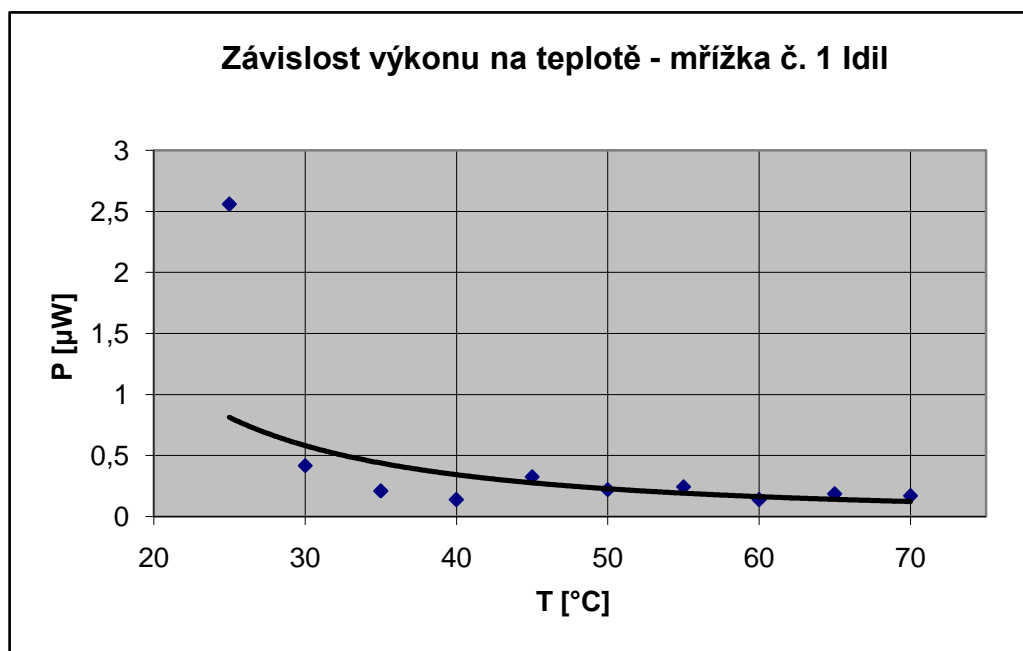
Tab. 2 Naměřené hodnoty výkonu a vlnové délky – zdroj Idil, mřížka č. 1, 1550,450 nm

7.4.3 Grafy závislostí pro laser Noyes



Z grafů je zřejmé, že při zvyšující se teplotě roste přenesený výkon a také vlnová délka propuštěná mřížkou se zvětšuje. Měřený výkon má poměrně velký rozptyl. Graf výkonu ukazuje, že použití širokospektrálního laseru není pro toto měření příliš vhodné z důvodu jeho nestability. Vlnová délka naopak roste poměrně lineárně.

7.4.4 Grafy závislostí pro laser Idil



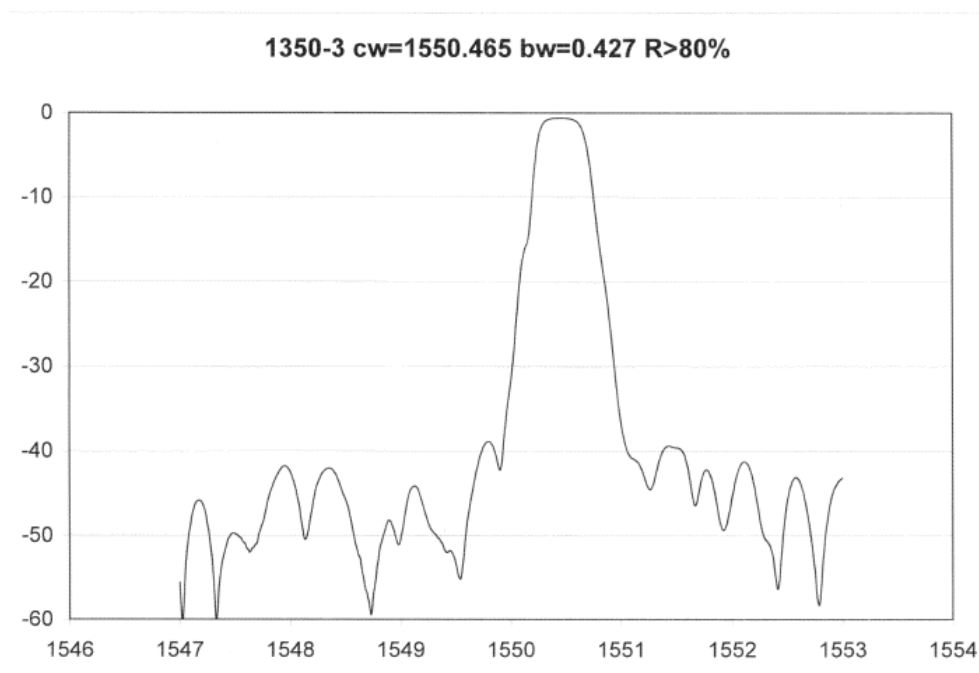
Z grafů je zřejmé, že při zvyšující se teplotě přenesený výkon klesá a vlnová délka propuštěná mřížkou se zvětšuje. Při použití tohoto laserového zdroje nevykazují naměřené hodnoty výkonu takový rozptyl jako při použití zdroje Noyes. Je to díky tomu že laserový zdroj Idil je úzkospektrální. Průběh vlnové délky se chová podobně jako při použití zdroje Noyes.

7.5 Měření Braggovy mřížky č. 2 – 1550,465 nm

Katalogové označení měřené mřížky je 1350-3 $\lambda_c=1550,465$ $\lambda_b=0,427$ $R>80\%$. Spektrální charakteristiku mřížky zobrazuje obr. 21. Při měření této Braggovy mřížky jsem použil zdroj Noyes pracující na vlnové délce 1550 nm a zdroj Idil pracující na stejné vlnové délce. Měřicí pracoviště bylo zapojeno podle popisu v kapitole 7.3. Při měření jsem postupoval tak jak je popsáno v kapitole 7.1 a využil při něm všechny přístroje popsané v kapitole 7.2. Naměřené hodnoty jsem rozdělil podle použitého optického zdroje. Tyto hodnoty jsem zaznamenal do tabulek tab. 3 a tab. 4 a vynesl do grafů.

7.5.1 Spektrální charakteristika měřené mřížky

Spektrální charakteristika nám ukazuje, na jaké Braggově vlnové délce pracuje měřená mřížka. V grafu je tato vlnová délka znázorněna výrazným impulzem.



Obr. 21 Spektrální charakteristika Braggovy mřížky č. 2 – 1550,465 nm

7.5.2 Naměřené hodnoty

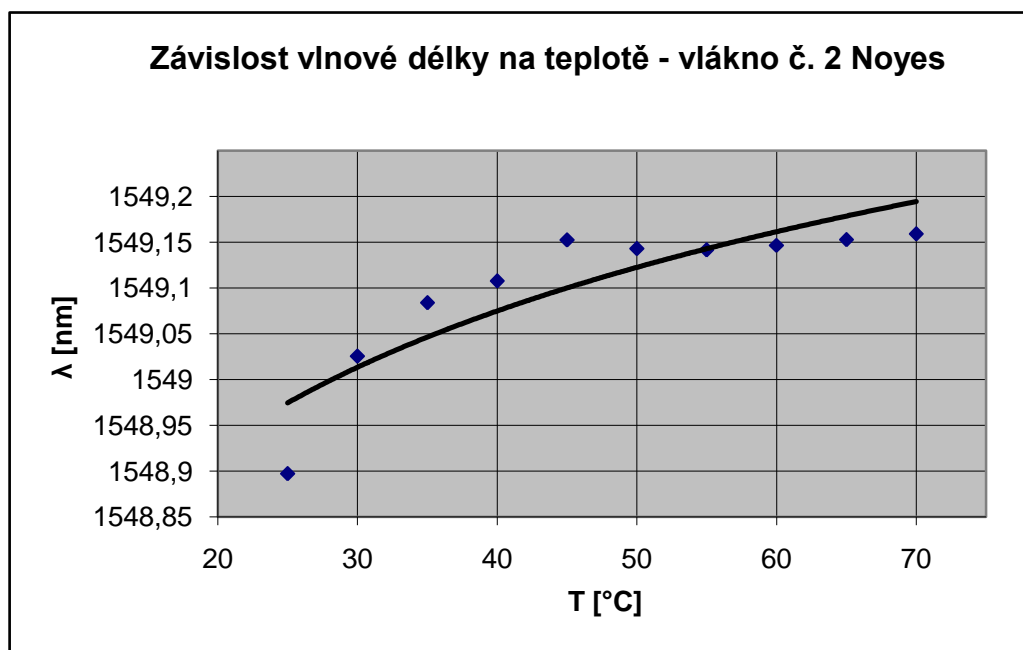
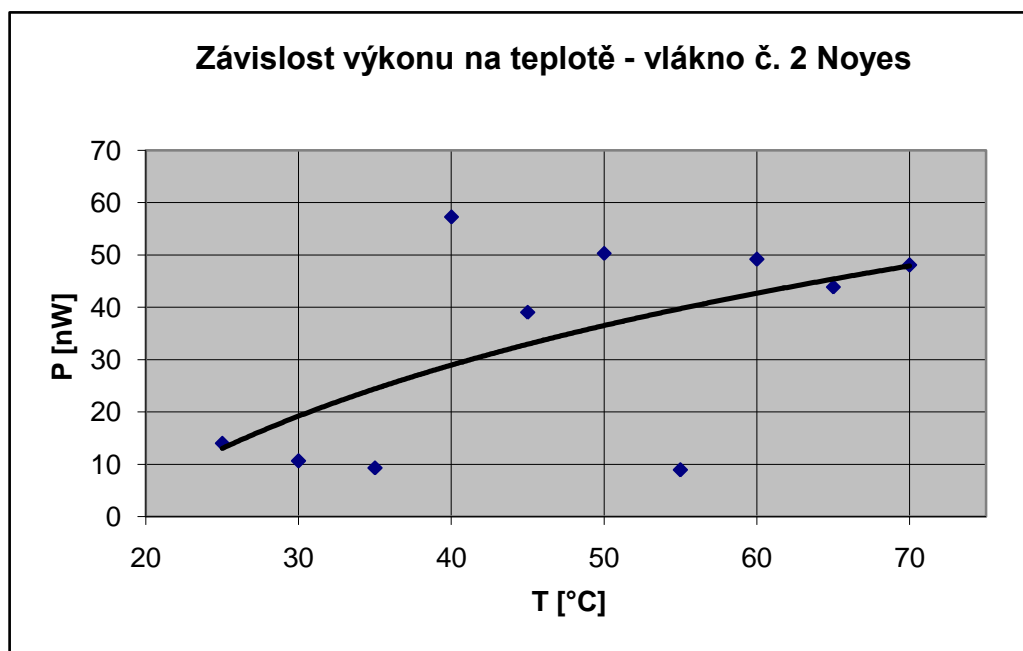
Teplota vlákna T [°C]	Přenesený výkon P [μW]	Vlnová délka λ [nm]
25	14,041	1548,8972
30	10,648	1549,0254
35	9,316	1549,0839
40	57,309	1549,1076
45	39,072	1549,1525
50	50,322	1549,1429
55	8,918	1549,1416
60	49,215	1549,1467
65	43,906	1549,1528
70	48,108	1549,1591

Tab. 3 Naměřené hodnoty výkonu a vlnové délky – zdroj Noyes, mřížka č. 2, 1550,465 nm

Teplota vlákna T [°C]	Přenesený výkon P [μW]	Vlnová délka λ [nm]
25	3,071	1548,2795
30	0,891	1548,6080
35	0,581	1548,7199
40	0,367	1548,7853
45	0,615	1548,8000
50	0,573	1548,8100
55	0,591	1548,8159
60	0,544	1548,8201
65	0,554	1548,8311
70	0,408	1548,8379

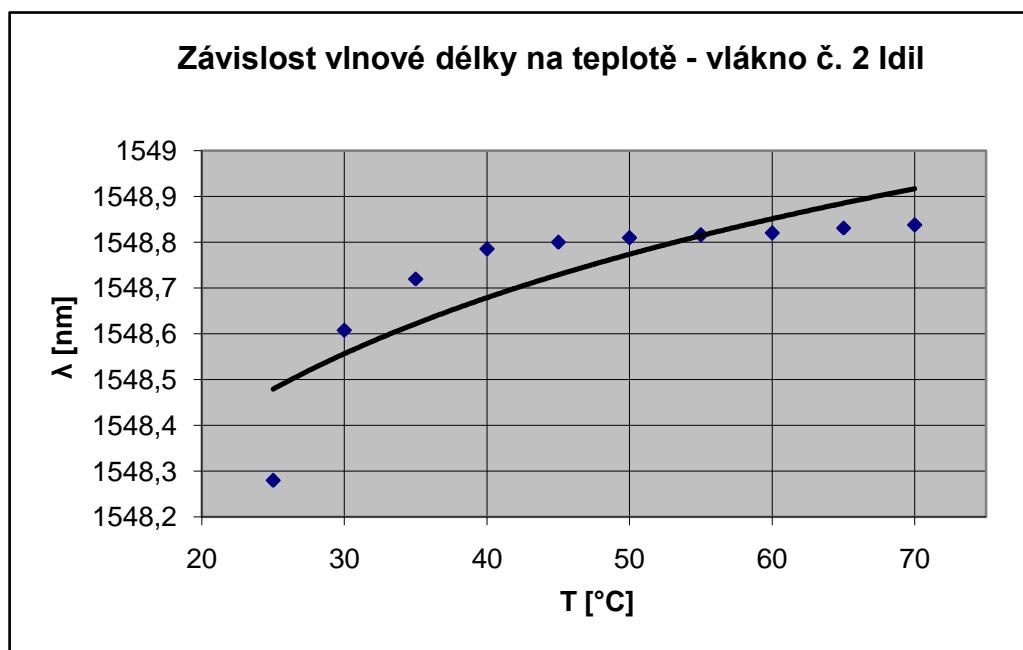
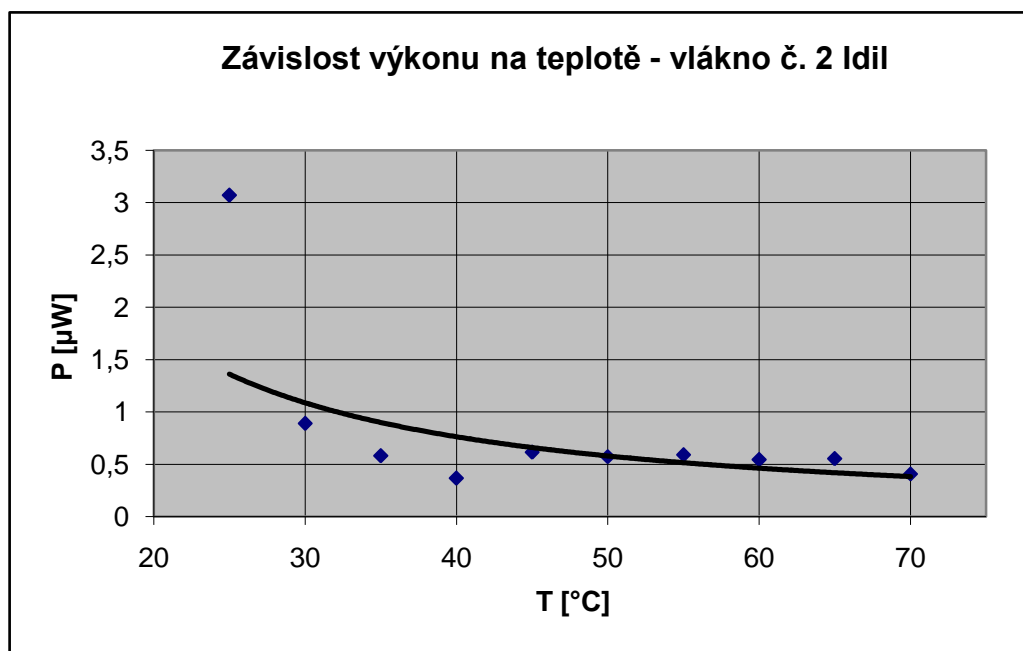
Tab. 4 Naměřené hodnoty výkonu a vlnové délky – zdroj Idil, mřížka č. 2, 1550,465 nm

7.5.3 Grafy závislostí pro laser Noyes



Z grafů je zřejmé, že při zvyšující se teplotě roste přenesený výkon a také vlnová délka propuštěná mřížkou se zvětšuje. Tato vláknová mřížka se chová obdobně jako předchozí typ mřížky. Měřený výkon má opět poměrně velký rozptyl, který je způsoben nestabilitou zdroje záření. Vlnová délka naopak roste poměrně lineárně.

7.5.4 Grafy závislostí pro laser Idil



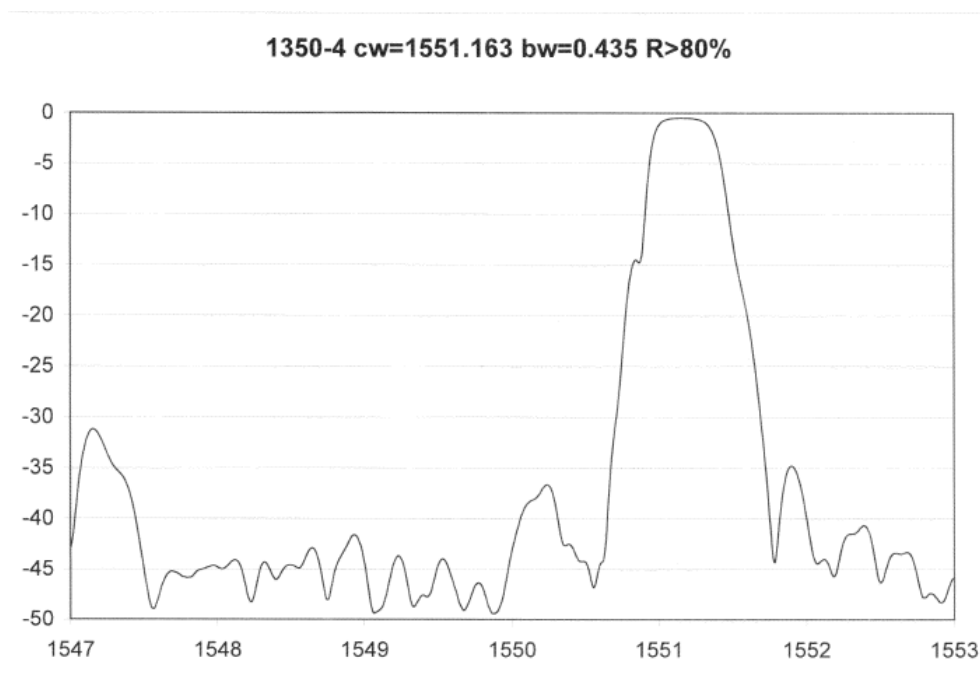
Z grafů je zřejmé, že při zvyšující se teplotě přenesený výkon klesá a vlnová délka propuštěná mřížkou se zvětšuje. Tato vláknová mřížka se chová obdobně jako předchozí typ mřížky. Při použití tohoto laserového zdroje nevykazují naměřené hodnoty výkonu takový rozptyl jako při použití zdroje Noyes. Je to díky tomu že laserový zdroj Idil je úzkospektrální. Průběh vlnové délky se chová podobně jako při použití zdroje Noyes.

7.6 Měření Braggovy mřížky č. 3 – 1551,163 nm

Katalogové označení měřené mřížky je 1350-4 $\lambda_c=1551,163$ $\Delta\lambda=0,435$ $R>80\%$. Spektrální charakteristiku mřížky zobrazuje obr. 22. Při měření této Braggovy mřížky jsem použil zdroj Noyes pracující na vlnové délce 1550 nm a zdroj Idil pracující na stejné vlnové délce. Měřicí pracoviště bylo zapojeno podle popisu v kapitole 7.3. Při měření jsem postupoval tak jak je popsáno v kapitole 7.1 a využil při něm všechny přístroje popsané v kapitole 7.2. Naměřené hodnoty jsem rozdělil podle použitého optického zdroje. Tyto hodnoty jsem zaznamenal do tabulek tab. 5 a tab. 6 a vynesl do grafů.

7.6.1 Spektrální charakteristika měřené mřížky

Spektrální charakteristika nám ukazuje, na jaké Braggově vlnové délce pracuje měřená mřížka. V grafu je tato vlnová délka znázorněna výrazným impulzem.



Obr. 22 Spektrální charakteristika Braggovy mřížky č. 3 – 1551,163 nm

7.6.2 Naměřené hodnoty

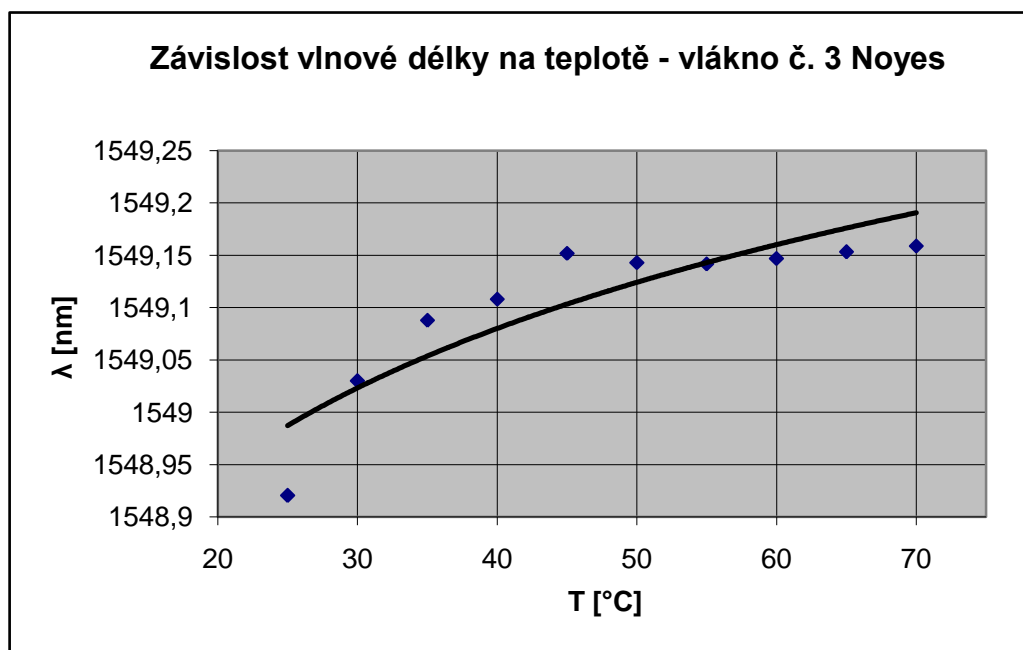
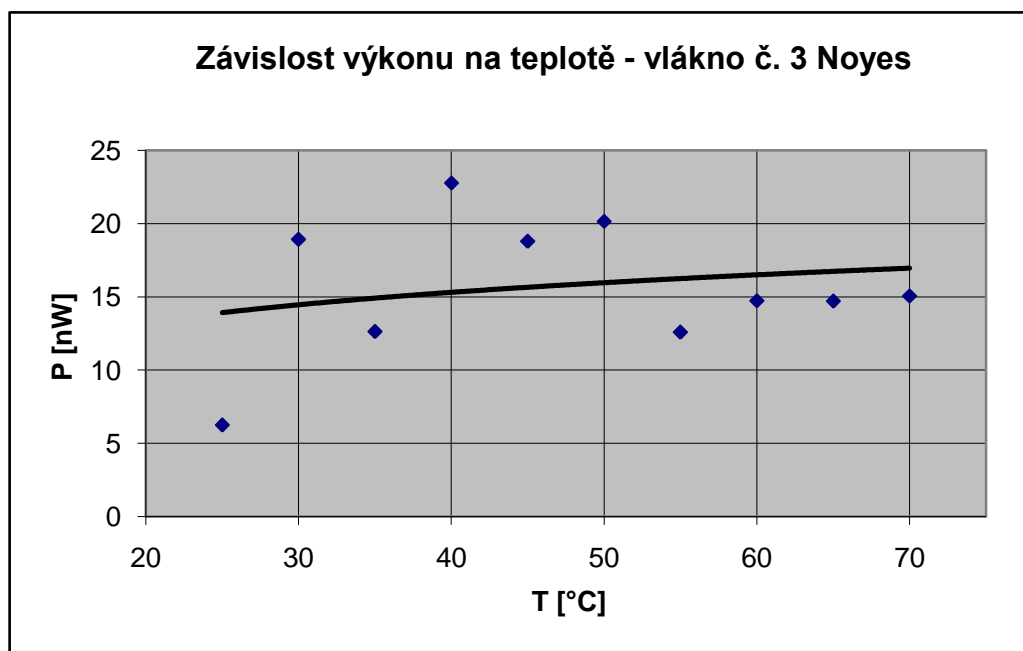
Teplota vlákna T [°C]	Přenesený výkon P [μW]	Vlnová délka λ [nm]
25	6,250	1548,9205
30	18,931	1549,0301
35	12,625	1549,0880
40	22,781	1549,1082
45	18,795	1549,1520
50	20,158	1549,1431
55	12,586	1549,1418
60	14,740	1549,1471
65	14,706	1549,1533
70	15,065	1549,1590

Tab. 5 Naměřené hodnoty výkonu a vlnové délky – zdroj Noyes, mřížka č. 3, 1551,163 nm

Teplota vlákna T [°C]	Přenesený výkon P [μW]	Vlnová délka λ [nm]
25	1,629	1548,2972
30	0,386	1548,6153
35	0,175	1548,7209
40	0,122	1548,7893
45	0,188	1548,7909
50	0,246	1548,8109
55	0,131	1548,8156
60	0,167	1548,8175
65	0,259	1548,8260
70	0,159	1548,8344

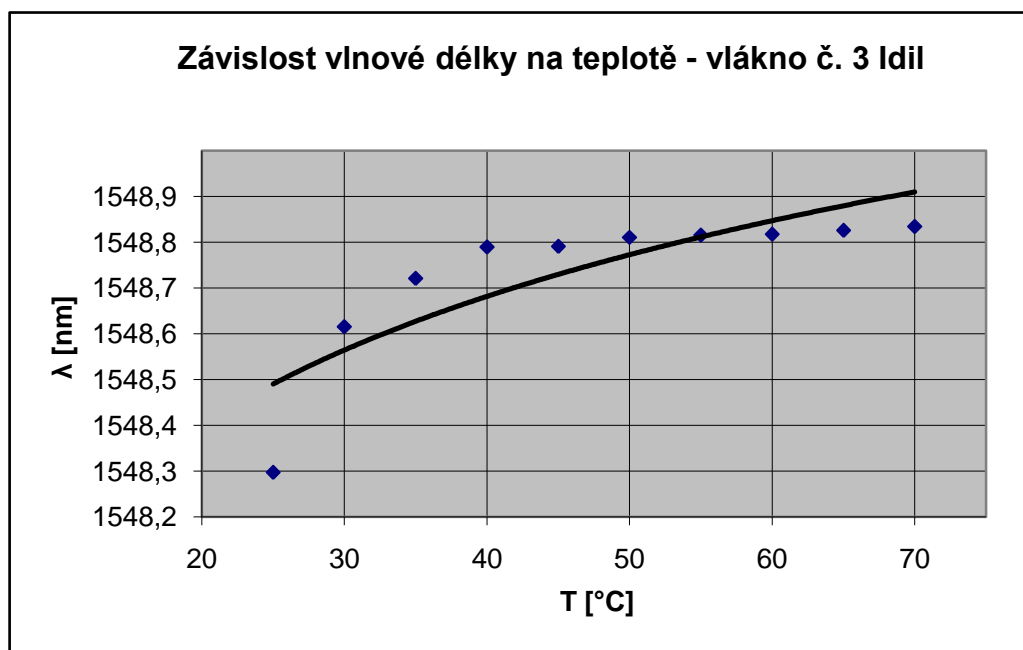
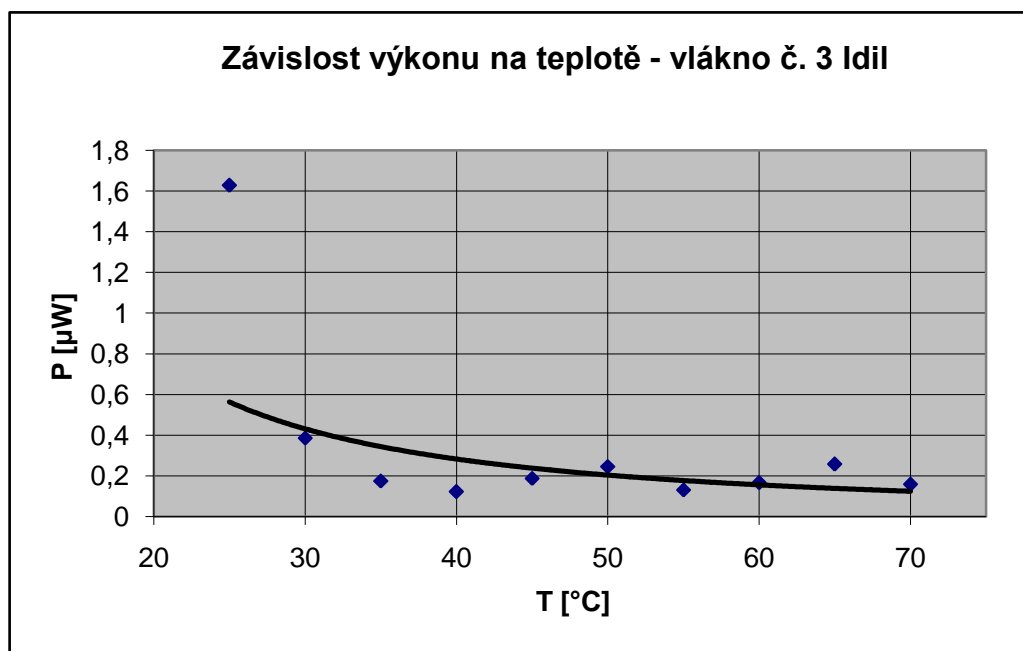
Tab. 6 Naměřené hodnoty výkonu a vlnové délky – zdroj Idil, mřížka č. 3, 1551,163 nm

7.6.3 Grafy závislostí pro laser Noyes



Z grafů je zřejmé, že při zvyšující se teplotě je přenesený výkon přibližně stejný a vlnová délka propuštěná mřížkou se zvětšuje. Rozptyl výkonu je stejně jako u dvou předchozích mřížek způsoben nestabilitou laserového zdroje. Tato mřížka se chová obdobně jako obě předchozí mřížky. Naměřená vlnová délka roste poměrně lineárně.

7.6.4 Grafy závislostí pro laser Idil



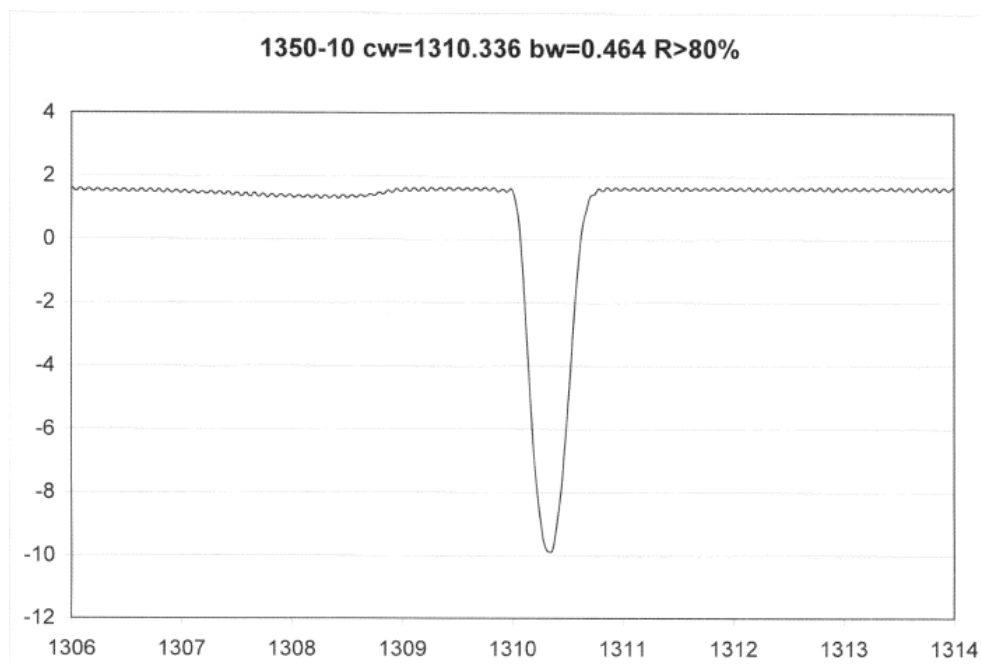
Z grafů je zřejmé, že při zvyšující se teplotě přenesený výkon klesá a vlnová délka propuštěná mřížkou se zvětšuje. Tato vláknová mřížka se chová obdobně jako obě předchozí mřížky. Při použití tohoto laserového zdroje nevykazují naměřené hodnoty výkonu takový rozptyl jako při použití zdroje Noyes. Je to díky tomu že laserový zdroj Idil je úzkospektrální. Průběh vlnové délky se chová podobně jako při použití zdroje Noyes.

7.7 Měření Braggovy mřížky č. 4 – 1310,336 nm

Katalogové označení měřené mřížky je 1350-10 $\lambda_c=1310,336$ $\lambda_b=0,464$ $R>80\%$. Spektrální charakteristiku mřížky zobrazuje obr. 23. Při měření této Braggovy mřížky jsem použil pouze zdroj Noyes pracující na vlnové délce 1310 nm. Měřicí pracoviště bylo zapojeno podle popisu v kapitole 7.3. Při měření jsem postupoval tak jak je popsáno v kapitole 7.1 a využil při něm všechny přístroje popsané v kapitole 7.2. Naměřené hodnoty jsem zaznamenal do tabulky tab. 7 a vynesl do grafů.

7.7.1 Spektrální charakteristika měřené mřížky

Spektrální charakteristika nám ukazuje, na jaké Braggově vlnové délce pracuje měřená mřížka. V grafu je tato vlnová délka znázorněna výrazným poklesem.



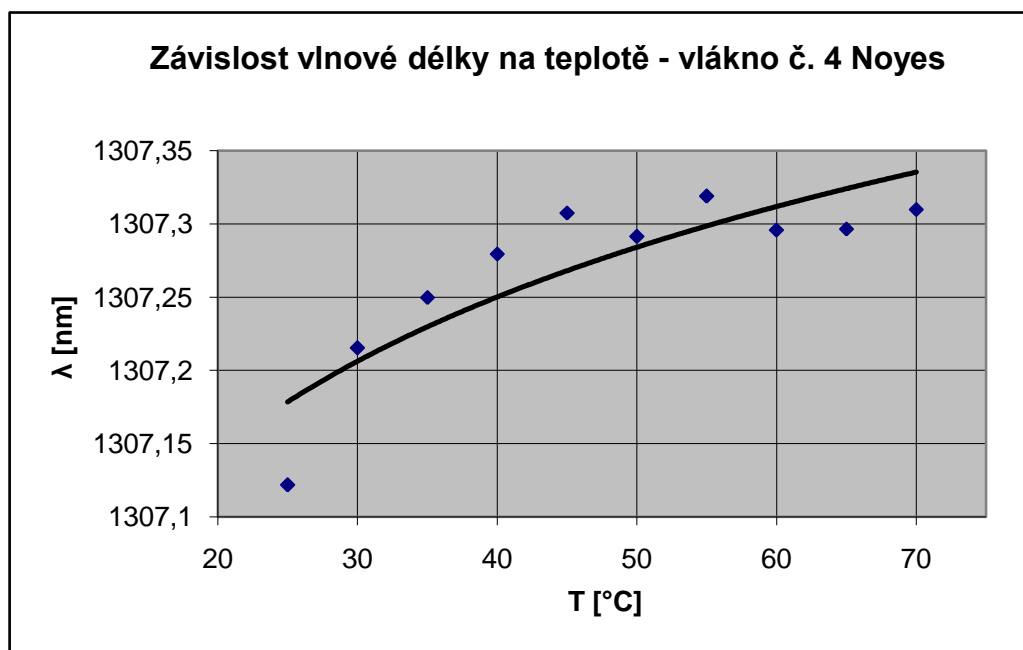
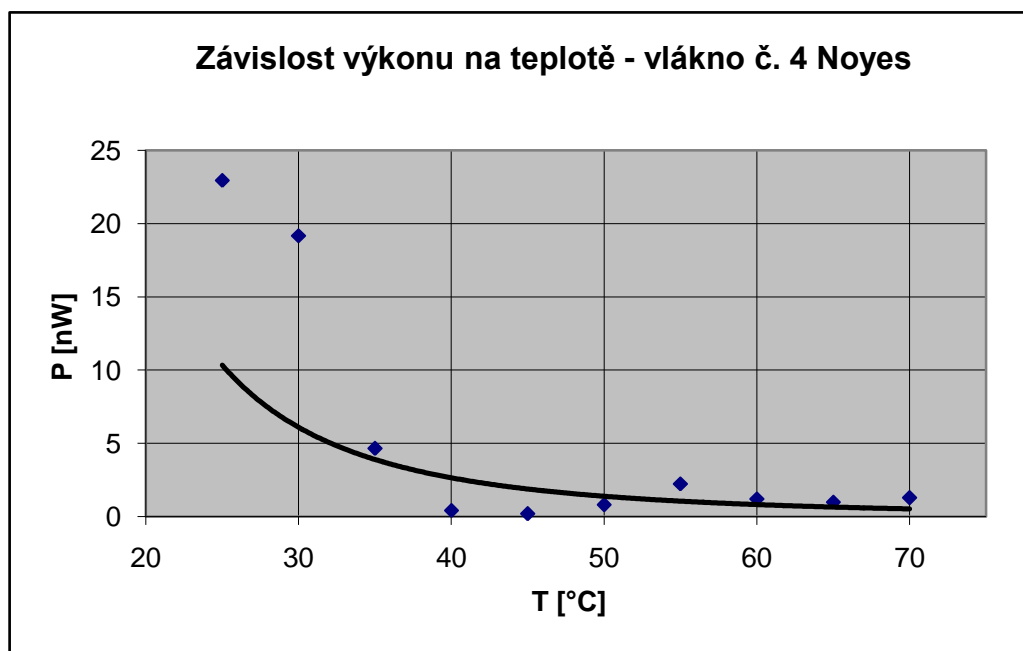
Obr. 23 Spektrální charakteristika Braggovy mřížky č. 4 – 1310,336 nm

7.7.2 Naměřené hodnoty

Teplota vlákna T [°C]	Přenesený výkon P [μW]	Vlnová délka λ [nm]
25	22,959	1307,1218
30	19,179	1307,2154
35	4,646	1307,2498
40	0,426	1307,2795
45	0,200	1307,3075
50	0,806	1307,2914
55	2,238	1307,3190
60	1,207	1307,2959
65	0,993	1307,2966
70	1,283	1307,3099

Tab. 7 Naměřené hodnoty výkonu a vlnové délky – zdroj Noyes, mřížka č. 4, 1310,336 nm

7.7.3 Grafy závislostí pro laser Noyes



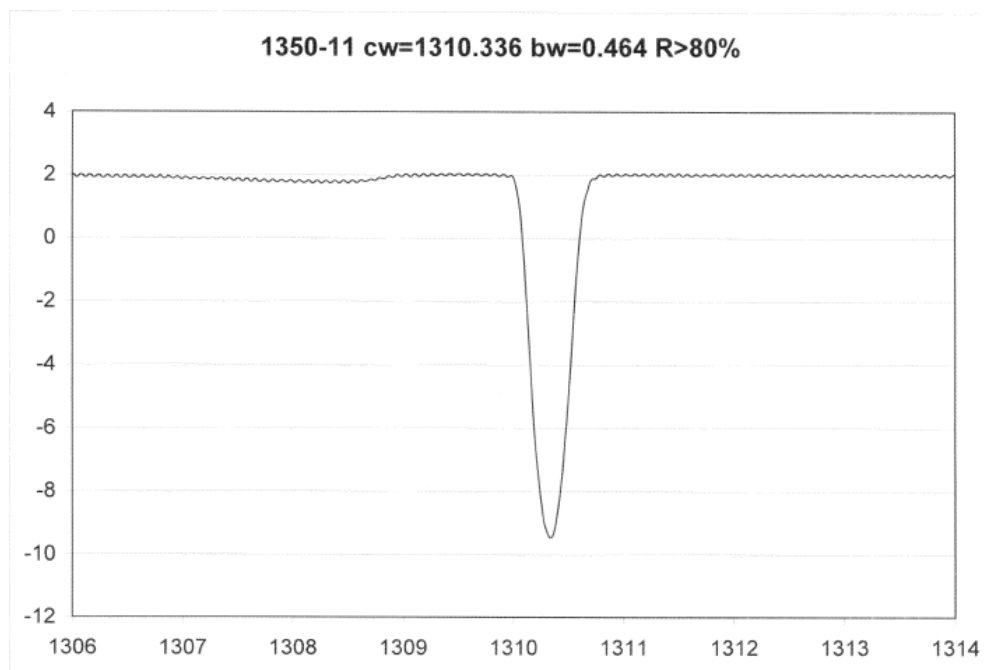
Z grafů je zřejmé, že při zvyšující se teplotě přenesený výkon klesá a vlnová délka propuštěná mřížkou se zvětšuje. Naměřené hodnoty mají poměrně malý rozptyl a to i přes to že byl použit širokospektrální laserový zdroj. Jak výkon, tak vlnová délka se chovají poměrně lineárně.

7.8 Měření Braggovy mřížky č. 5 – 1310,336 nm

Katalogové označení měřené mřížky je 1350-11 $\lambda_c=1310,336$ $\lambda_b=0,464$ $R>80\%$. Spektrální charakteristiku mřížky zobrazuje obr. 24. Při měření této Braggovy mřížky jsem použil pouze zdroj Noyes pracující na vlnové délce 1310 nm. Měřicí pracoviště bylo zapojeno podle popisu v kapitole 7.3. Při měření jsem postupoval tak jak je popsáno v kapitole 7.1 a využil při něm všechny přístroje popsané v kapitole 7.2. Naměřené hodnoty jsem zaznamenal do tabulky tab. 8 a vynesl do grafů.

7.8.1 Spektrální charakteristika měřené mřížky

Spektrální charakteristika nám ukazuje, na jaké Braggově vlnové délce pracuje měřená mřížka. V grafu je tato vlnová délka znázorněna výrazným poklesem.



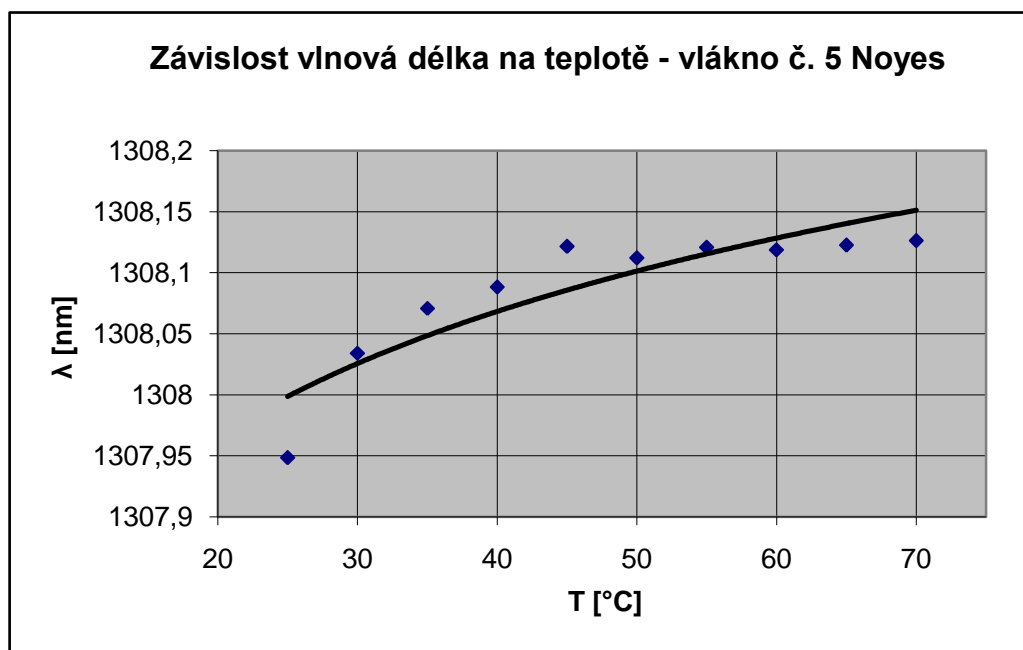
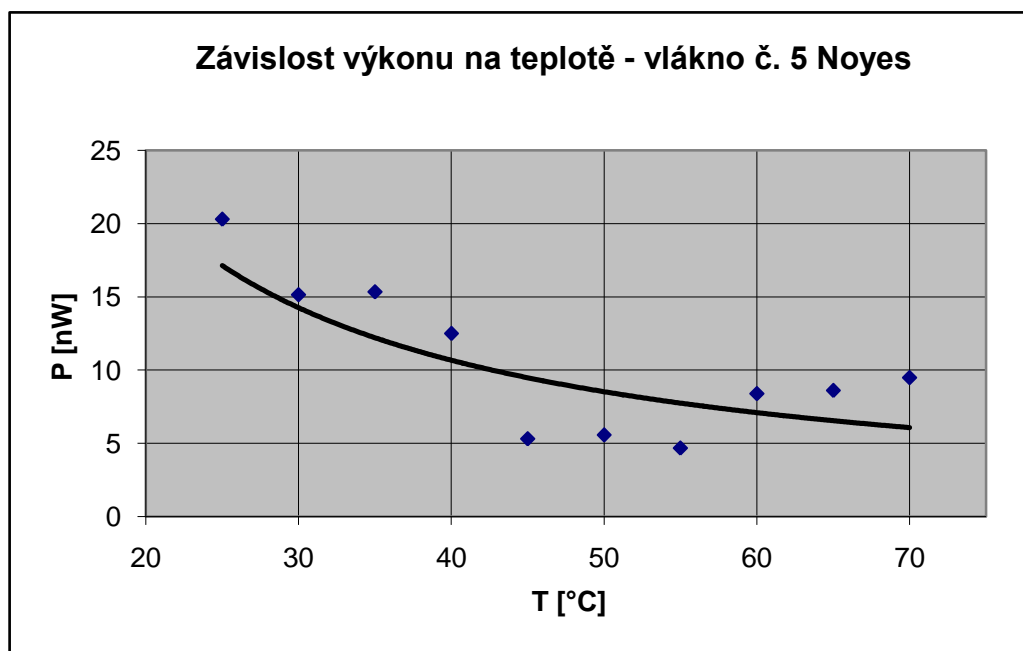
Obr. 24 Spektrální charakteristika Braggovy mřížky č. 5 – 1310,336 nm

7.8.2 Naměřené hodnoty

Teplota vlákna T [°C]	Přenesený výkon P [μW]	Vlnová délka λ [nm]
25	20,308	1307,9485
30	15,148	1308,0341
35	15,342	1308,0708
40	12,501	1308,0882
45	5,303	1308,1216
50	5,570	1308,1121
55	4,681	1308,1208
60	8,384	1308,1188
65	8,604	1308,1226
70	9,477	1308,1263

Tab. 8 Naměřené hodnoty výkonu a vlnové délky – zdroj Noyes, mřížka č. 5, 1310,336 nm

7.8.3 Grafy závislostí pro laser Noyes



Z grafů je zřejmé, že při zvyšující se teplotě přenesený výkon klesá a vlnová délka propuštěná mřížkou se zvětšuje. Naměřené hodnoty mají poměrně malý rozptyl a to i přes to že byl použit širokospektrální laserový zdroj. Jak výkon, tak vlnová délka se chovají poměrně lineárně.

7.9 Zhodnocení naměřených údajů

Proměřil jsem celkem pět vláknových optických mřížek. Tři z těchto mřížek pracují na vlnové délce blízké 1550 nm. Dvě mřížky pracují na vlnové délce blízké 1330 nm. Jako zdroje optického záření jsem použil dva typy laserů. Laser Noyes který vyzařuje širokospektrální světlo a laser Idil který naopak vyzařuje velmi úzkospektrální světlo. Při použití zdroje Noyes byly určité problémy s odečítáním naměřených hodnot. Laser byl nestabilní a tuto nestabilitu je možné vidět v grafech jako velký rozptyl naměřených hodnot. Tento velký rozptyl hodnot se projevil při měření na vlnové délce 1550 nm u propuštěného výkonu. Při měření mřížek pracujících na 1330 nm se rozptyl u propuštěného výkonu projevil také, ale v menší míře. Naopak při použití zdroje Idil bylo odečítání naměřených hodnot velmi jednoduché. Při použití tohoto zdroje se neprojevil téměř žádný rozptyl naměřených hodnot.

Měřením jsem zjišťoval závislost výkonu a vlnové délky propuštěné mřížkou na teplotě v okolí mřížky. Zjistil jsem, že se mřížky pracující na vlnové délce 1550 nm chovají velmi podobně. Podobně se také chovají mřížky pracující na vlnové délce 1330 nm. Z grafů výkonu je zřejmé že první tři měřená vlákna se chovají obdobně. Tyto mřížky se chovají stejně při použití zdroje Noyes kdy u nich roste naměřený propuštěný výkon se vzrůstající teplotou. Naopak při použití zdroje Idil se vzrůstající teplotou u nich propuštěný výkon klesá. Poslední dvě mřížky pracující na vlnové délce 1330 nm se také chovají obdobně. Se vzrůstající teplotou u nich propuštěný výkon klesá. Při měření propuštěné vlnové délky se všech pět mřížek chová obdobně. Se vzrůstající teplotou se propuštěná vlnová délka u všech měřených mřížek posouvá směrem k vyšším hodnotám. Tento posun je velmi malý. Při ohřívání vlákna z pokojové teploty 25°C na konečných 70°C se vlnová délka posune o několik desetin nm. Měřené mřížky se takto chovají jak při použití zdroje Noyes, tak i při použití zdroje Idil.

7.10 Stanovení teplotního a prostorového rozlišení

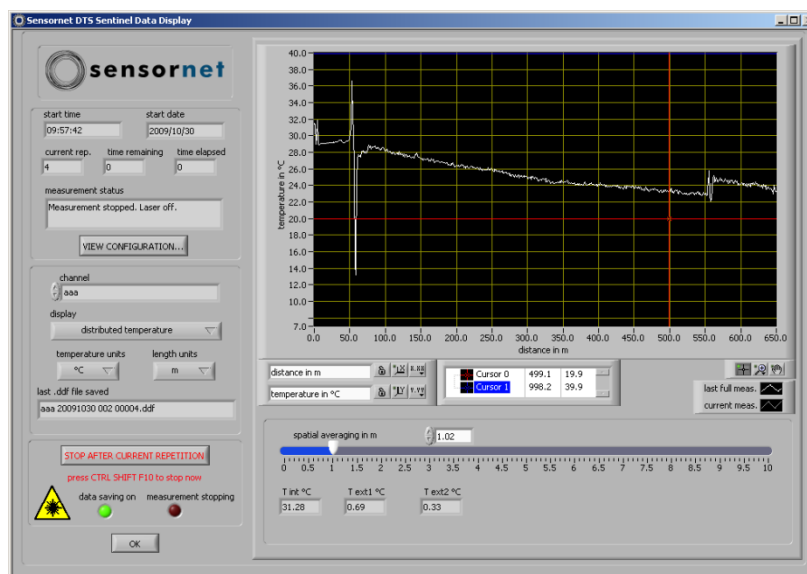
Měřil jsem změnu propuštěné vlnové délky a výkonu mřížkou v závislosti na změně teploty mřížky. Rozlišitelnost měření je v případě vlnové délky 0,0001 nm a výkonu 0,001 μW a je dána přesností měřicího přístroje WA-7600. Prostorová rozlišitelnost je dána délkou Braggovy mřížky. Každá měřená Braggova mřížka má délku asi 4 cm a jedná se tedy o bodový senzor. Do jednoho optického vlákna lze současně umístit sériově až dvacet těchto senzorů. Mřížky mohou být od sebe libovolně vzdáleny. S popsanou přesností jsem pracoval při měření. Jedná se o velmi přesné měřicí systémy.

8 Měření teploty pomocí Ramanova jevu

Pro měření teploty pomocí Ramanova jevu lze použít běžné MM komunikační optické vlákno. Toto optické vlákno se připojí k měřicímu přístroji a slouží jako senzor teploty. Místo běžných MM vláken se využívají také speciální senzorová vlákna. Pro měření teploty byly vybrány celkem tři speciální senzorová vlákna. Označení těchto vláken je SG1082, SG1087 a SG1097. Optická vlákna mají pouze primární ochranu a je třeba s nimi manipulovat opatrně.

8.1 Postup měření

Měřením zkoumám závislost změny teploty na poloměru ohybu senzorového optického vlákna. Jako počáteční teplotu měření jsem zvolil 25°C, poté jsem měřil při teplotě 30°C. Dále jsem teplotu zvyšoval po 10°C až do konečné teploty 70°C. Vliv ohybu jsem simuloval namotáváním vlákna na válečky o průměru 15 až 35 mm. Válečků bylo celkem pět a jejich průměr se zvyšoval po 5 mm. Pro každou teplotu jsem namotal vždy jeden závit vlákna na každý váleček. Všechny naměřené hodnoty jsem vynesl do grafů. Byly proměřeny celkem tři senzorová optická vlákna. Při měření jsem používal DTS měřicí přístroj Sentinel-DTS. Tento měřicí přístroj je podrobněji popsán v kapitole 8.2. Naměřené hodnoty se snadno odečítaly, protože měřicí přístroj je vykresluje graficky přímo na monitor (viz. obr. 25). Tyto grafy zobrazují teplotu v okolí celého měřeného vlákna a je možné je uložit jako obrázek. Pro lepší práci s naměřenými průběhy je ale lepší naměřená data uložit jako datový soubor.



Obr. 25 Výstupní obrazovka měřicího přístroje Sentinel-DTS

8.2 Přístroje používané při měření

Pro měření bylo využito DTS měřicího přístroje Sentinel-DTS který je používán jak v laboratorních podmínkách, tak i v terénu pracovníky katedry telekomunikační techniky. Tento měřicí přístroj je jednoúčelový a využívá Ramanova jevu pro měření teploty v okolí optického vlákna. Tvoří jej samotný přístroj, který je zobrazený na obr. 26 a k němu připojený monitor a klávesnice s touchpadem. Přístroj je vlastně počítač doplněný o moduly nutné pro měření. Jsou to především obvody laseru a detektoru optického záření. V počítači je nainstalován operační systém Windows 2000. Pro samotné měření slouží program Sensornet DTS. Okno tohoto programu je zobrazeno na obr. 25. Ovládání programu je velmi jednoduché. Na začátku měření je nutné tento program správně nastavit. Nastavuje se především délka měření a počet iterací (opakování) měření, dále délka měřeného vlákna a délka úseku vlákna, který bude sloužit jako samostatný senzor. Po nastavení programu se spustí měření. Naměřený průběh se zobrazí do grafu, který je v průběhu měření zpřesňován. Osy grafu lze nastavovat podle potřeby a tím si zobrazovat detaily průběhu. Naměřený průběh lze zaznamenat pomocí uložení okna přístroje jako obrázek. Přístroj data zaznamenává také ve formě souboru s tabulkou naměřené teploty v závislosti na vzdálenosti. Tyto data lze otevřít v tabulkovém procesoru a dále zpracovávat.

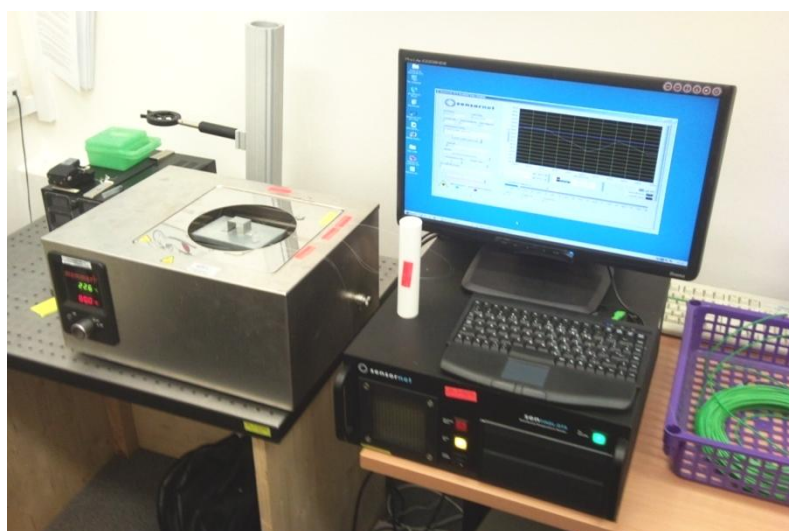


Obr. 26 Měřicí přístroj Sentinel-DTS

Optický impuls je vyslán ze zdroje záření, může jím být např. injekční laser, který nám generuje úzké optické impulsy s pološířkou řádově desítky až tisíce nanosekund a opakovací frekvencí několik kHz. Tento vygenerovaný optický impuls dále pokračuje prostřednictvím směrovaného vazebního článku, optickým děličem nebo vazební optikou doplněnou o polopropustná zrcátka či jiného typu rozdělovače svazků do analyzovaného optického vlákna. Zpětně odražené nebo rozptýlené záření vracející se z měřeného optického vlákna prochází stejným optickým děličem a dále je vedeno k velmi rychlému a preciznímu

detektoru, kterým může být např. lavinová APD fotodioda (Avalanche Photo Diode). V ní je detekované záření převedeno na elektrický signál a ten je veden do analogového popř. digitálního integrátoru. To je provedeno z důvodu toho, že vracející se signál má velmi malou úroveň (-45 až -60 dBr) a je zatížen šumem. Proto je nutné signál z detektoru zprůměrovat, tak abychom získali užitečný signál, který nebude natolik zatížen šumem a bude jej možné dále zpracovat. Užitečný signál z integrátoru je pak dále veden do logaritmického zesilovače nebo je logaritmování zprůměrovaného signálu provedeno digitálně pro získání hodnot v decibelech (dB). Výsledné naměřené hodnoty jsou poté zobrazeny na zobrazovací jednotce (displeji). [6]

Pro nastavení a změnu teploty v okolí vlákna byl opět použit kalorimetr Memert. Přesnost nastavení teploty byla kontrolována teploměrem Testo 720. Oba tyto přístroje byly podrobně popsány v kapitole 7.2. Na rozdíl od měření Braggových mřížek jsem použil místo oleje vodní lázeň.

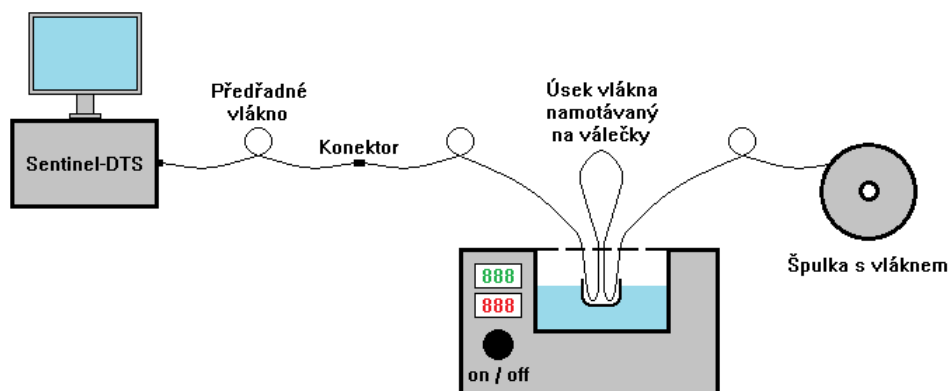


Obr. 27 Měřicí pracoviště pro měření teploty pomocí Ramanova jevu

8.3 Zapojení měřicího pracoviště

Měřicí pracoviště jsem sestavil z přístrojů popsaných v kapitole 8.2. Přístroje jsem zapojil podle schéma zobrazeného na obr. 28. Sestava měřicích přístrojů, které jsem při měření využil je zobrazena na obr. 27. Měřená sensorová vlákna bylo nutné před samotným měřením opatřit montážními konektory typu SC. Měřicí přístroj je však vybaven konektorem typu E2000. Toto však nepředstavuje problém, protože k měřicímu přístroji se ještě před úsekem s měřeným vláknem připojuje předřadné vlákno. Toto vlákno má délku 50 m a slouží k překlenutí tzv. mrtvé zóny, ve které není možné měřit. Předřadné vlákno je na obou koncích vybaveno

příslušnými konektory. Ze všech měřených vláken jsem nejdříve odmotal 15 m, abych předešel problémům a nepřesnostem měření, které mohou způsobit konektory na předřadném vlákně. Následně jsem vložil 1 m vlákna do plechové krabičky. Další 1 m vlákna jsem vyvedl ven z krabičky, na tomto úseku jsem prováděl namotávání na válečky. Následující 1 m vlákna jsem opět vložil do plechové krabičky. Tuto krabičku jsem vložil do vodní lázně zahřívané kalorimetrem Memert. Z krabičky byl vyveden úsek vlákna dlouhý 3 m. Další část vlákna byla ponechána namotaná na špulce. Použil jsem stejnou plechovou krabičku s víkem jako při měření s Braggovými mřížkami. Takto jsem umístil současně všechny tři měřená senzorová optická vlákna. Měření každého vlákna zvlášť by bylo velmi časově náročné z důvodu dlouhé doby chladnutí vodní lázně. V průběhu měření jsem jednotlivá vlákna přepojoval. Nakonec jsem připojil začátek předřadného vlákna k měřicímu přístroji Sentinel-DTS. Do všech optických konektorů jsem použil optický gel pro zlepšení přenosu optického signálu.

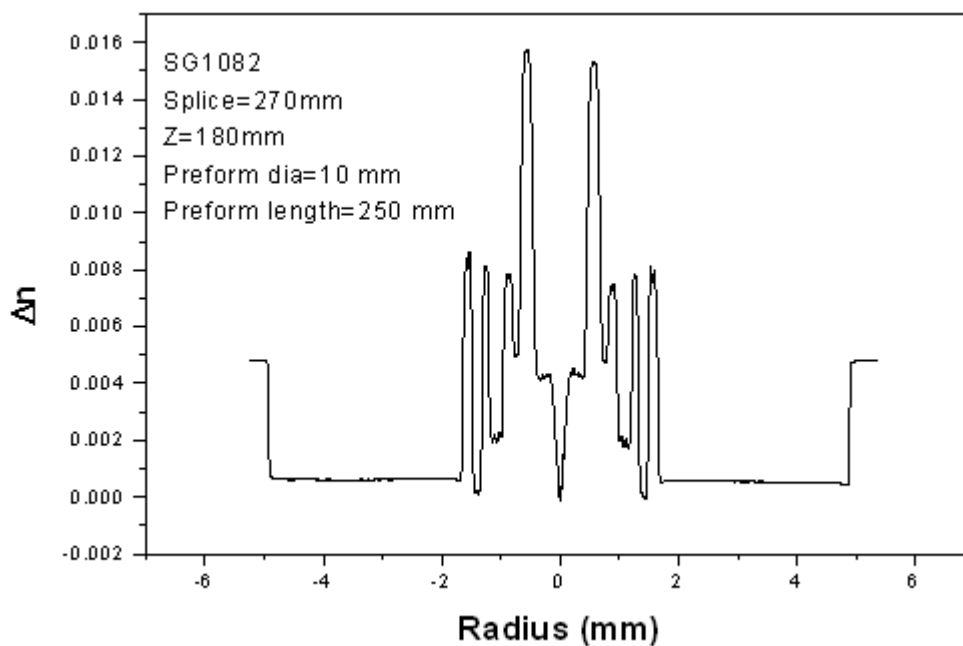


Obr. 28 Schéma zapojení měřicího pracoviště

8.4 Měření optického vlákna SG1082

Katalogové označení sensorového optického vlákna je SG1082. Toto vlákno bylo vyrobeno na zakázku a nelze jej běžně koupit. Jedná se o experimentální sensorové optické vlákno. Profil indexu lomu vlákna zobrazuje obr. 29. Měřicí pracoviště bylo zapojeno podle popisu v kapitole 8.3. Při měření jsem postupoval tak jak je popsáno v kapitole 8.1 a využil při něm všechny přístroje popsané v kapitole 8.2. Naměřené hodnoty jsem získal ve formě souborů dat. Z těchto dat jsem vybral část údajů, které jsou významné. Rozdělil jsem je podle měřené teploty a zaznamenal do tabulek hodnot tab. 9 až tab. 15. Tyto údaje jsem zpracoval a výsledky vynesl do grafů.

8.4.1 Profil indexu lomu měřeného vlákna



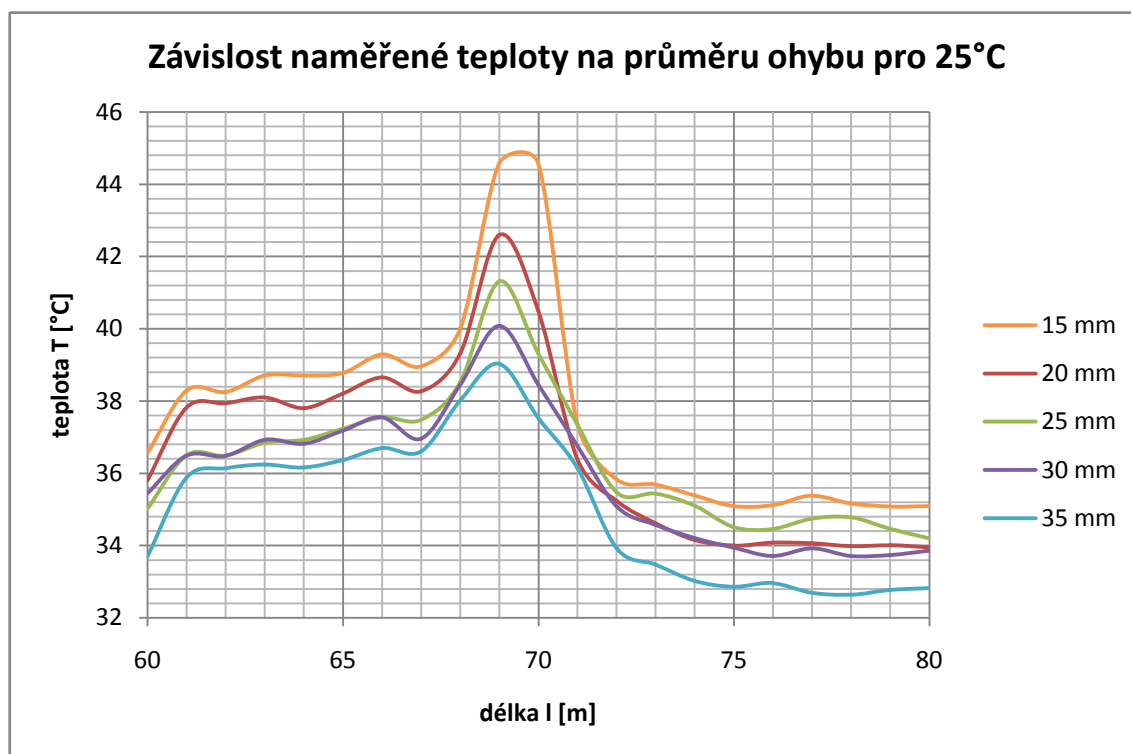
Obr. 29 Profil indexu lomu sensorového optického vlákna SG1082

8.4.2 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 25°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	38,25	37,94	36,49	36,48	36,14
63	38,71	38,10	36,85	36,93	36,24
64	38,71	37,80	36,93	36,82	36,16
65	38,78	38,21	37,24	37,18	36,37
66	39,29	38,65	37,55	37,55	36,70
67	38,96	38,27	37,48	36,96	36,61
68	40,00	39,32	38,52	38,45	38,02
69	44,58	42,60	41,31	40,08	39,03
70	44,56	40,49	39,31	38,45	37,53
71	37,36	36,39	37,34	36,76	36,15
72	35,83	35,23	35,47	35,08	33,92
73	35,69	34,61	35,44	34,57	33,47
74	35,38	34,15	35,10	34,21	33,02
75	35,09	34,00	34,51	33,94	32,86
76	35,12	34,08	34,46	33,71	32,96
77	35,38	34,06	34,75	33,92	32,69
78	35,16	33,98	34,78	33,71	32,64

Tab. 9 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.4.3 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 25°C

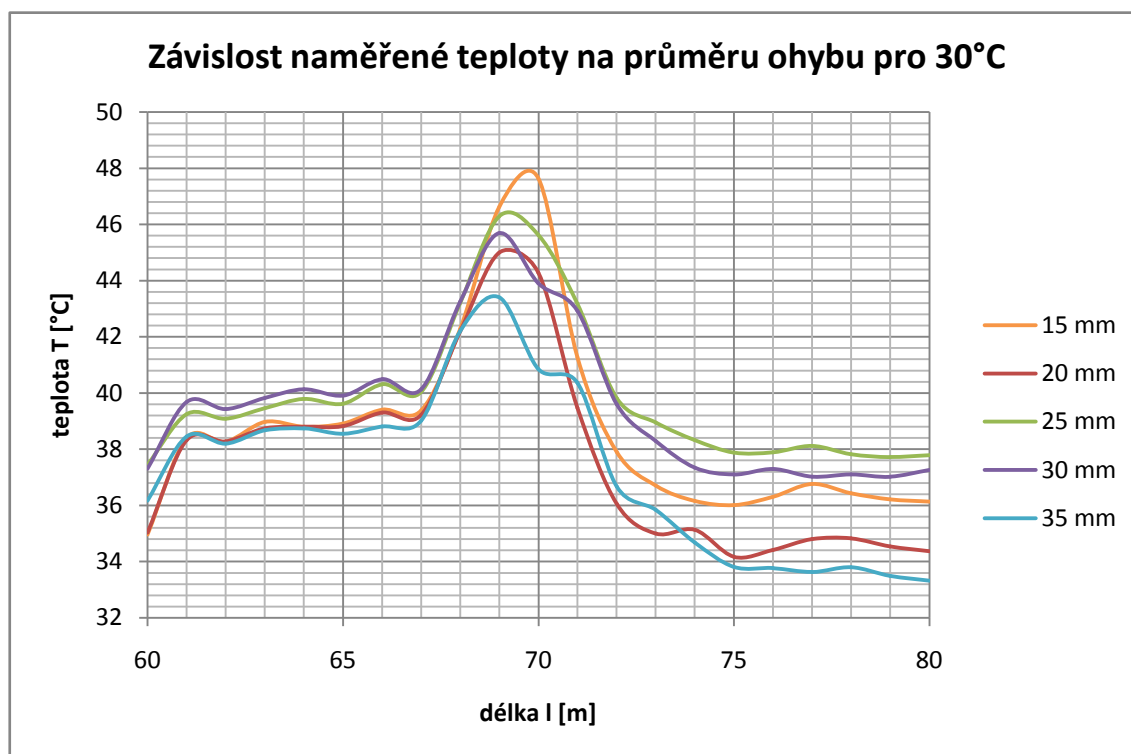


8.4.4 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 30°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	38,27	38,28	39,09	39,43	38,20
63	38,97	38,74	39,46	39,83	38,67
64	38,80	38,80	39,79	40,13	38,74
65	38,92	38,82	39,62	39,91	38,55
66	39,41	39,30	40,31	40,49	38,81
67	39,38	39,22	40,04	40,13	39,02
68	42,29	42,20	43,21	43,25	42,21
69	46,63	45,00	46,29	45,69	43,40
70	47,64	44,28	45,62	43,90	40,85
71	41,27	39,47	43,17	42,93	40,36
72	37,90	36,05	39,82	39,60	36,67
73	36,70	35,00	38,95	38,29	35,84
74	36,16	35,13	38,32	37,34	34,68
75	36,01	34,17	37,88	37,10	33,81
76	36,31	34,42	37,89	37,30	33,77
77	36,76	34,80	38,12	37,02	33,63
78	36,43	34,83	37,82	37,10	33,80

Tab. 10 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.4.5 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 30°C

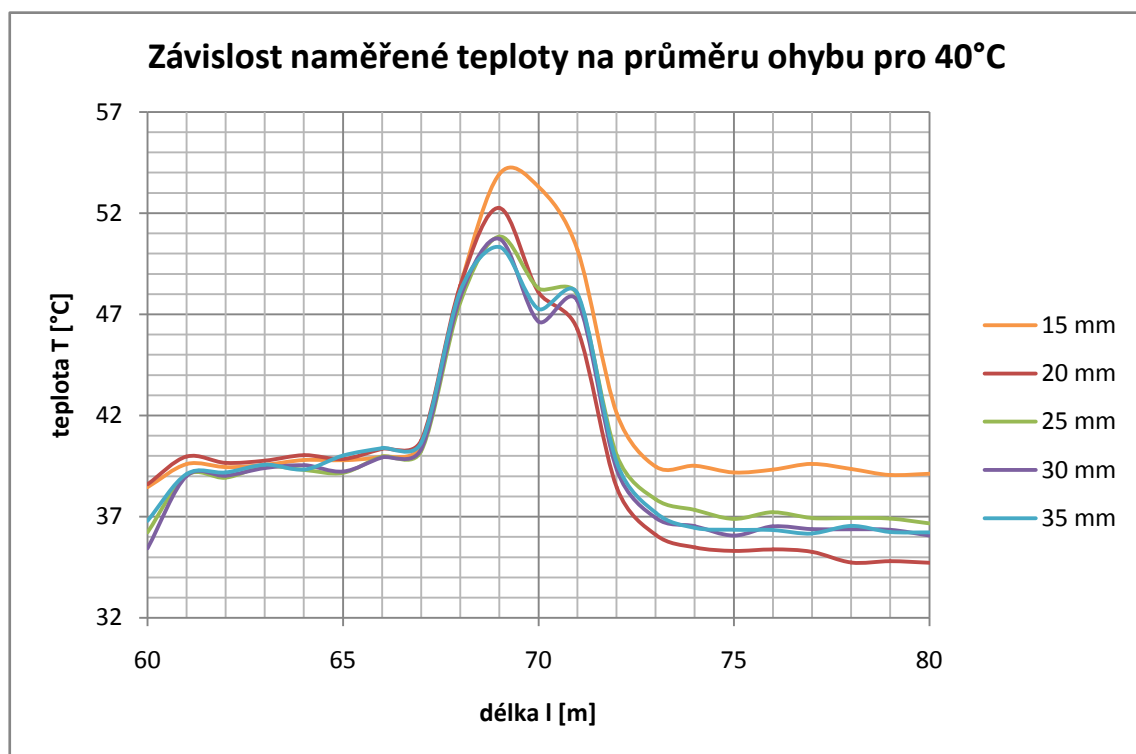


8.4.6 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 40°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	39,45	39,66	38,93	39,03	39,19
63	39,56	39,77	39,49	39,40	39,57
64	39,80	40,04	39,31	39,54	39,33
65	39,79	39,85	39,16	39,23	40,02
66	39,97	40,36	39,98	39,93	40,39
67	40,55	40,77	40,25	40,34	40,65
68	48,39	48,42	47,59	47,86	48,15
69	53,93	52,26	50,84	50,73	50,33
70	53,31	48,10	48,29	46,65	47,27
71	50,19	46,25	47,97	47,67	48,03
72	42,09	38,44	40,04	39,33	39,68
73	39,47	36,10	37,86	36,93	37,19
74	39,51	35,48	37,33	36,53	36,44
75	39,18	35,31	36,89	36,07	36,35
76	39,32	35,38	37,22	36,52	36,34
77	39,61	35,26	36,93	36,39	36,17
78	39,36	34,73	36,94	36,38	36,54

Tab. 11 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.4.7 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 40°C

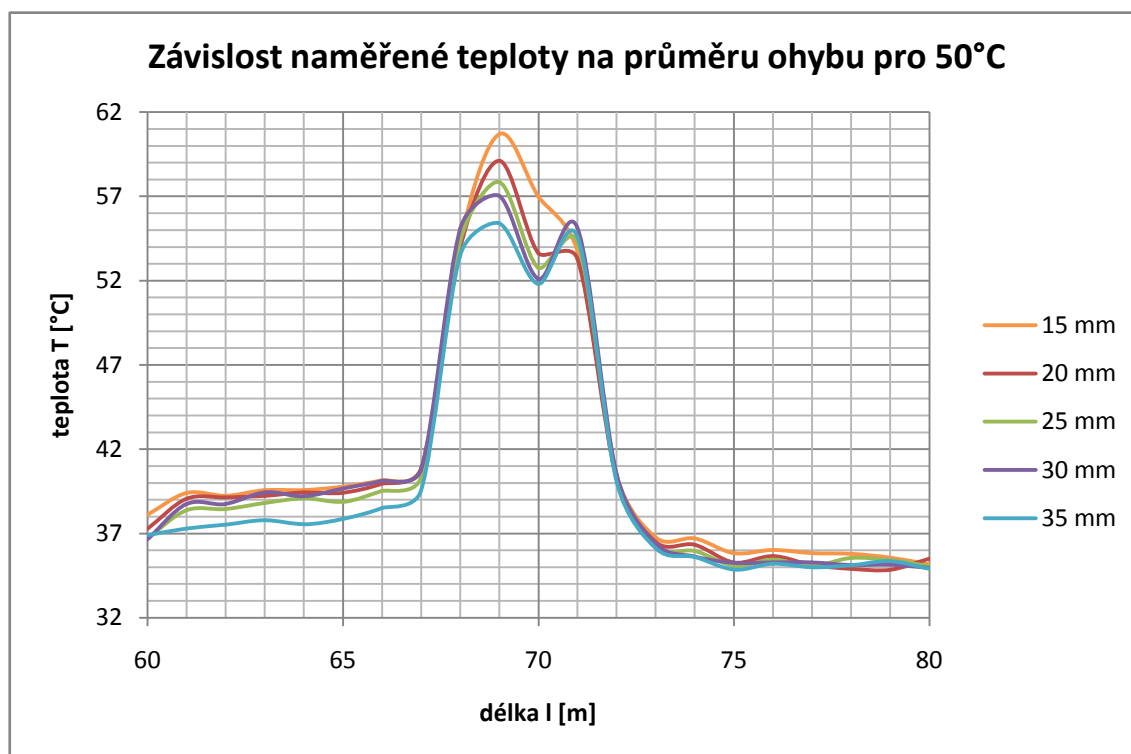


8.4.8 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 50°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	39,24	39,14	38,45	38,75	37,53
63	39,57	39,24	38,81	39,45	37,79
64	39,58	39,44	39,09	39,21	37,55
65	39,78	39,42	38,88	39,67	37,87
66	40,16	39,95	39,53	40,12	38,52
67	40,80	40,89	40,36	40,80	39,58
68	54,37	53,95	54,33	55,08	53,52
69	60,68	59,11	57,84	57,03	55,40
70	56,99	53,63	52,76	52,10	51,81
71	53,74	53,29	54,33	55,13	54,61
72	40,43	40,21	40,46	40,46	40,04
73	36,76	36,49	36,29	36,41	36,12
74	36,71	36,33	35,96	35,63	35,60
75	35,84	35,28	35,09	35,26	34,86
76	36,02	35,66	35,46	35,29	35,21
77	35,84	35,13	35,07	35,29	34,99
78	35,79	34,91	35,55	35,13	35,12

Tab. 12 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.4.9 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 50°C

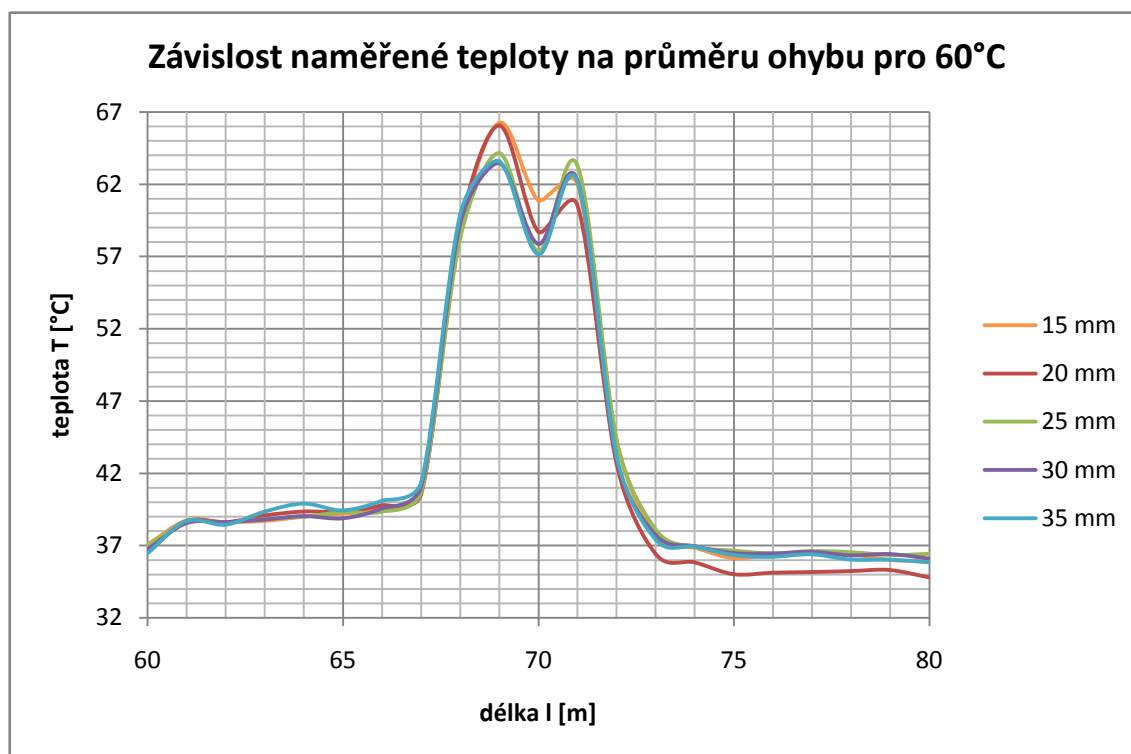


8.4.10 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 60°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	38,63	38,60	38,60	38,62	38,44
63	38,70	39,08	38,83	38,81	39,35
64	38,99	39,35	39,00	39,04	39,90
65	39,19	39,34	39,31	38,88	39,44
66	39,56	39,79	39,35	39,58	40,11
67	40,79	40,57	40,72	41,10	41,39
68	58,64	59,04	58,29	59,32	59,94
69	66,25	66,07	64,16	63,45	63,59
70	60,88	58,71	57,37	57,87	57,15
71	62,03	60,56	63,31	62,29	62,20
72	44,24	42,61	44,26	42,96	43,15
73	37,62	36,40	38,08	37,72	37,40
74	36,84	35,83	36,90	36,95	36,92
75	36,12	35,01	36,64	36,48	36,33
76	36,40	35,12	36,45	36,46	36,22
77	36,44	35,16	36,62	36,57	36,39
78	36,38	35,24	36,55	36,32	36,03

Tab. 13 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.4.11 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 60°C

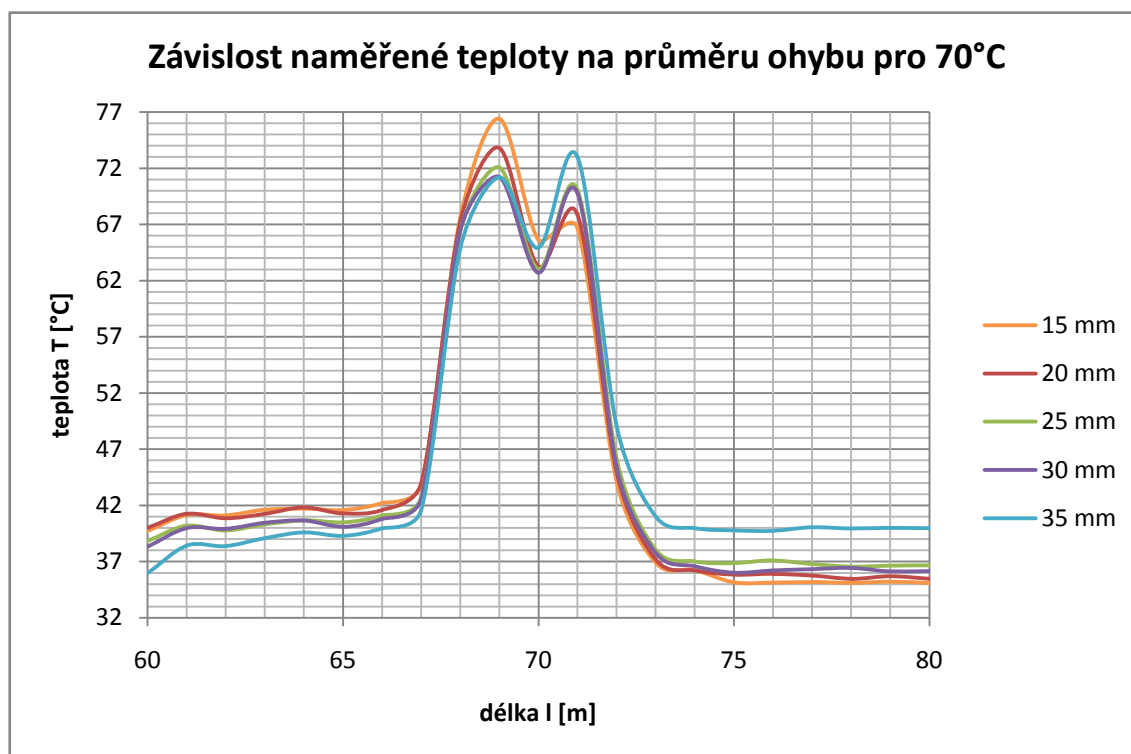


8.4.12 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 70°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	41,11	40,87	39,77	39,92	38,37
63	41,62	41,26	40,31	40,45	39,08
64	41,72	41,83	40,67	40,65	39,59
65	41,60	41,29	40,50	40,10	39,29
66	42,21	41,61	41,11	40,81	39,96
67	43,89	43,98	42,74	42,58	41,61
68	67,60	67,23	66,37	66,47	64,87
69	76,41	73,82	72,07	71,23	71,20
70	65,63	63,27	63,03	62,70	64,91
71	66,70	67,89	70,10	69,79	73,02
72	44,05	44,94	46,10	45,36	49,01
73	36,89	37,17	38,04	37,76	40,99
74	36,25	36,20	37,01	36,58	39,97
75	35,16	35,84	36,86	36,01	39,77
76	35,14	35,91	37,11	36,21	39,74
77	35,18	35,77	36,79	36,33	40,05
78	35,11	35,47	36,55	36,44	39,95

Tab. 14 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.4.13 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 70°C

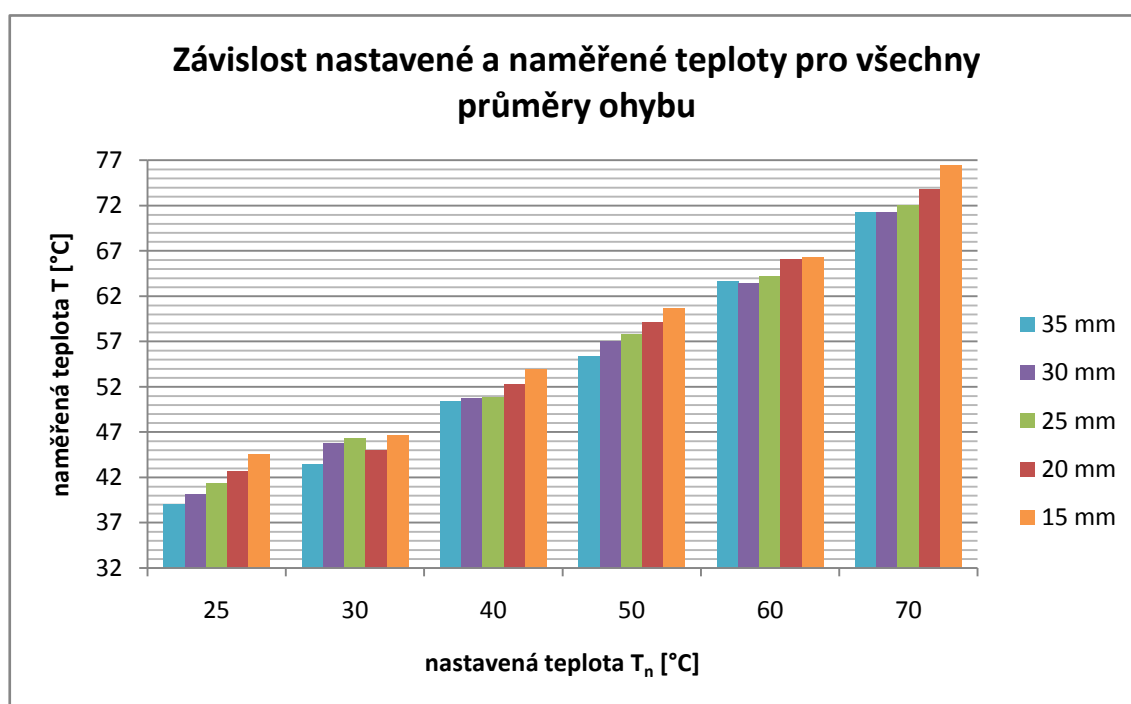


8.4.14 Naměřené maximální hodnoty teploty

Nastavená teplota T_n [°C]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
25	44,58	42,60	41,31	40,08	39,03
30	46,63	45,00	46,29	45,69	43,40
40	53,93	52,26	50,84	50,73	50,33
50	60,68	59,11	57,84	57,03	55,40
60	66,25	66,07	64,16	63,45	63,59
70	76,41	73,82	72,07	71,23	71,20

Tab. 15 Naměřené maximální hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.4.15 Graf závislostí nastavené a naměřené teploty

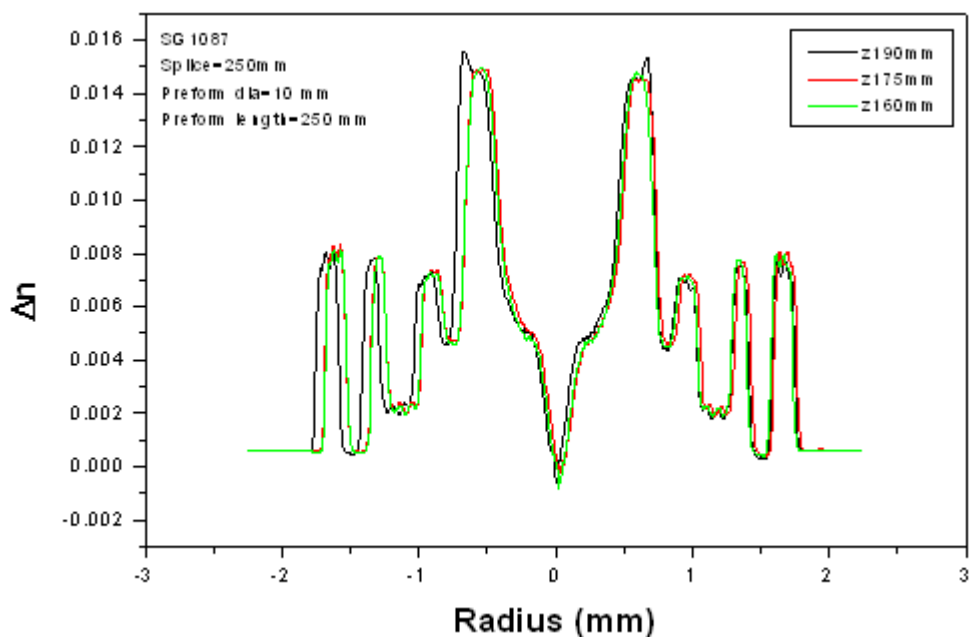


Z grafů je zřejmé, že při snižujícím se průměru ohybu vlákna naměřená teplota roste. Znamená to tedy, že měření teploty touto metodou je citlivé na ohyb vlákna. Děje se to u všech měřených teplot. U vyšších teplot je citlivost na ohyb menší. Naměřená celková teplota také velmi výrazně překračuje skutečnou nastavenou teplotu v okolí vlákna. Tato chyba je největší pro nízké teploty okolí vlákna. S postupným zahříváním vlákna se chyba snižuje a pro 60°C a 70°C již odpovídá naměřená teplota skutečné teplotě v okolí vlákna. Pokles teploty na vrcholu grafů je způsoben vyvedením této části vlákna mimo zahřívanou oblast. Tato část vlákna byla namotávána na válečky různých průměrů pro simulaci ohybu vlákna.

8.5 Měření optického vlákna SG1087

Katalogové označení sensorového optického vlákna je SG1087. Toto vlákno bylo vyrobeno na zakázku a nelze jej běžně koupit. Jedná se o experimentální sensorové optické vlákno. Profil indexu lomu vlákna zobrazuje obr. 30. Měřicí pracoviště bylo zapojeno podle popisu v kapitole 8.3. Při měření jsem postupoval tak jak je popsáno v kapitole 8.1 a využil při něm všechny přístroje popsané v kapitole 8.2. Naměřené hodnoty jsem získal ve formě souborů dat. Z těchto dat jsem vybral část údajů, které jsou významné. Rozdělil jsem je podle měřené teploty a zaznamenal do tabulek hodnot tab. 16 až tab. 22. Tyto údaje jsem zpracoval a výsledky vynesl do grafů.

8.5.1 Profil indexu lomu měřeného vlákna



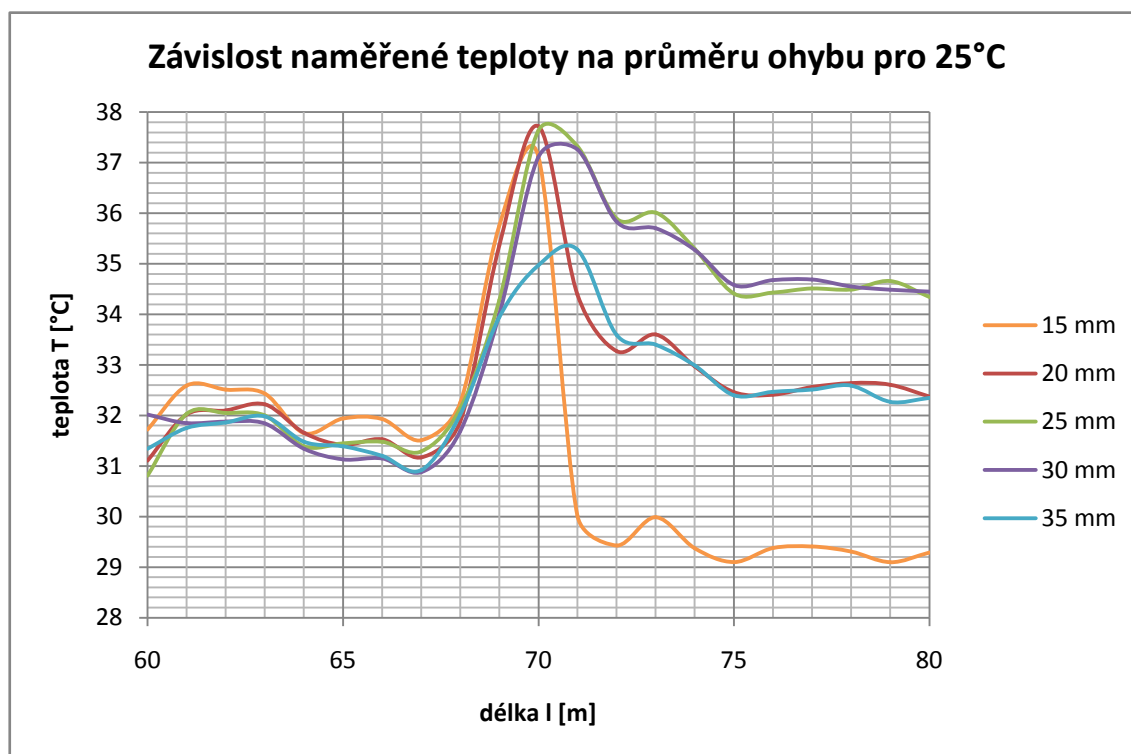
Obr. 30 Profil indexu lomu sensorového optického vlákna SG1087

8.5.2 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 25°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	32,51	32,10	32,05	31,88	31,86
63	32,43	32,22	32,00	31,84	31,98
64	31,65	31,66	31,39	31,34	31,48
65	31,94	31,42	31,45	31,13	31,39
66	31,93	31,53	31,48	31,15	31,20
67	31,51	31,17	31,29	30,88	30,92
68	32,25	31,88	32,14	31,69	32,02
69	35,75	35,36	34,28	34,00	33,94
70	37,12	37,72	37,63	37,11	34,97
71	30,02	34,39	37,32	37,26	35,28
72	29,43	33,27	35,89	35,83	33,59
73	29,99	33,60	36,01	35,70	33,40
74	29,37	32,97	35,29	35,27	32,99
75	29,10	32,46	34,41	34,58	32,40
76	29,38	32,41	34,43	34,68	32,47
77	29,41	32,56	34,51	34,69	32,51
78	29,31	32,64	34,49	34,55	32,59

Tab. 16 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.5.3 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 25°C

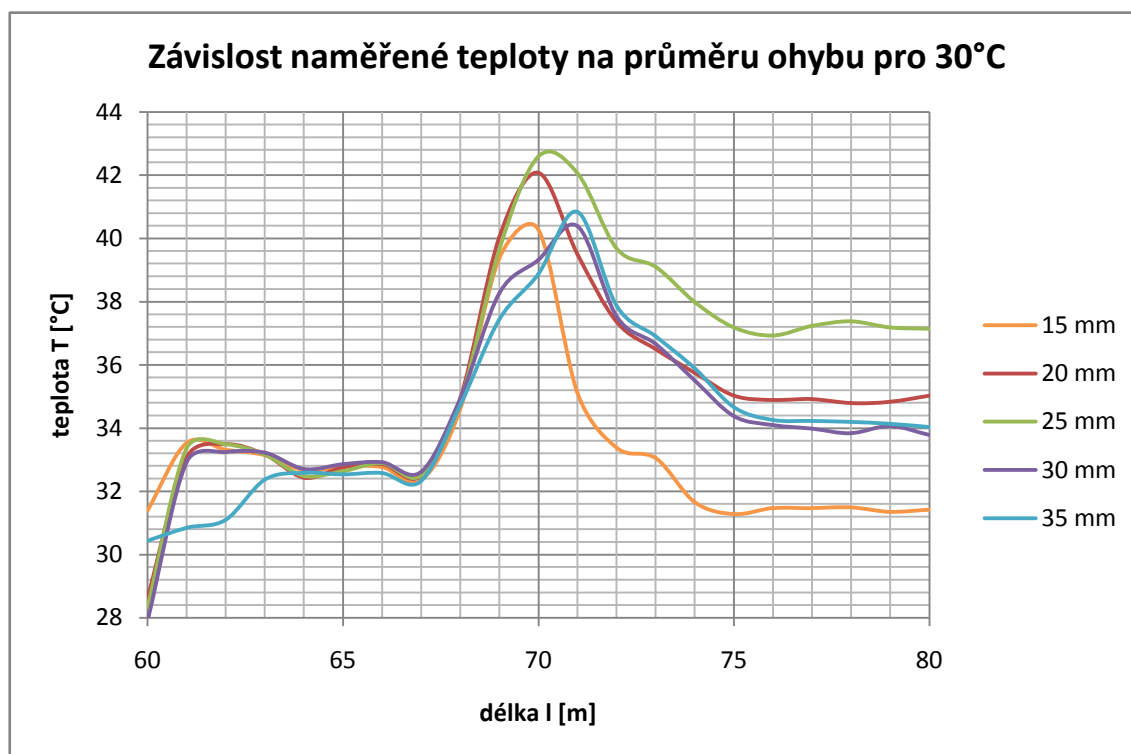


8.5.4 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 30°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	33,32	33,49	33,49	33,24	31,10
63	33,14	33,16	33,16	33,22	32,37
64	32,67	32,43	32,49	32,71	32,59
65	32,78	32,76	32,64	32,86	32,54
66	32,77	32,86	32,89	32,92	32,58
67	32,35	32,49	32,51	32,62	32,33
68	34,60	34,94	34,83	34,94	34,72
69	39,37	40,04	39,65	38,27	37,44
70	40,28	42,08	42,59	39,32	38,88
71	35,12	39,50	42,07	40,39	40,84
72	33,38	37,36	39,68	37,53	37,86
73	33,05	36,50	39,10	36,66	36,90
74	31,66	35,75	37,98	35,50	35,89
75	31,28	35,03	37,18	34,38	34,66
76	31,47	34,89	36,93	34,10	34,26
77	31,47	34,92	37,23	33,98	34,23
78	31,49	34,79	37,38	33,84	34,20

Tab. 17 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.5.5 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 30°C

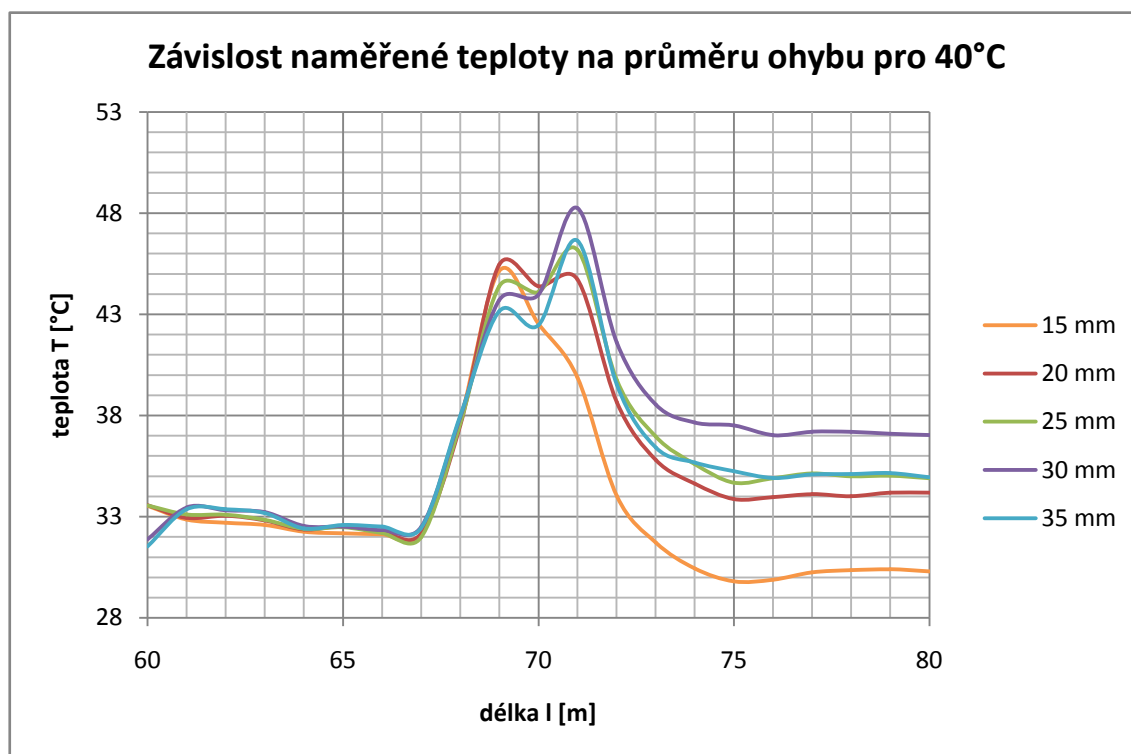


8.5.6 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 40°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	32,70	33,04	33,10	33,31	33,37
63	32,59	32,81	32,84	33,22	33,18
64	32,25	32,36	32,40	32,54	32,42
65	32,18	32,52	32,48	32,51	32,59
66	32,13	32,26	32,20	32,34	32,51
67	32,11	32,18	31,99	32,49	32,44
68	37,78	37,51	37,60	37,92	37,99
69	45,15	45,46	44,39	43,71	43,15
70	42,54	44,39	44,10	43,97	42,46
71	39,88	44,73	46,19	48,25	46,64
72	34,02	38,66	39,75	41,61	39,54
73	31,72	35,80	36,96	38,53	36,41
74	30,44	34,63	35,60	37,65	35,67
75	29,80	33,87	34,68	37,51	35,24
76	29,88	33,97	34,90	37,03	34,91
77	30,24	34,11	35,13	37,20	35,08
78	30,35	34,01	34,99	37,19	35,10

Tab. 18 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.5.7 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 40°C

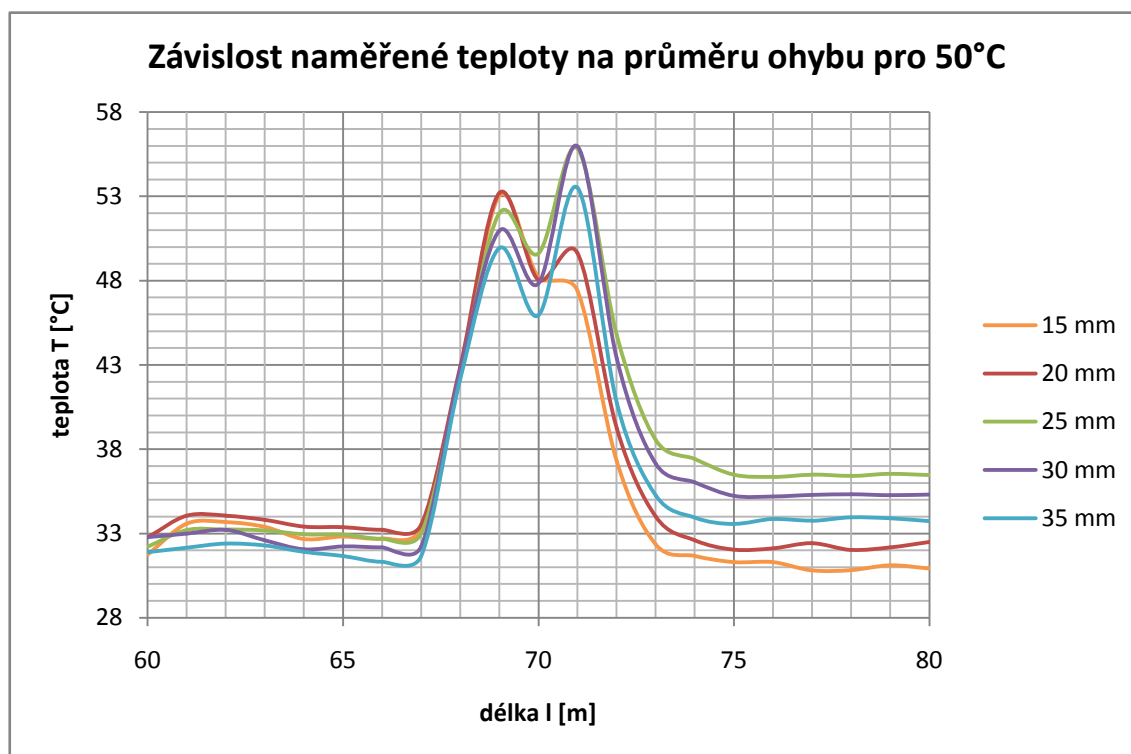


8.5.8 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 50°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	33,68	34,06	33,24	33,22	32,40
63	33,40	33,80	33,18	32,59	32,29
64	32,67	33,41	32,95	32,06	31,92
65	32,82	33,38	32,94	32,24	31,67
66	32,70	33,22	32,69	32,18	31,32
67	33,27	33,53	33,01	32,24	31,67
68	42,31	42,91	42,36	42,71	42,16
69	53,02	53,20	51,99	50,95	49,93
70	48,21	48,04	49,60	47,82	45,94
71	47,40	49,64	55,84	55,96	53,51
72	37,28	39,24	44,77	43,37	40,75
73	32,35	34,00	38,54	37,13	35,26
74	31,67	32,60	37,42	36,04	33,94
75	31,30	32,04	36,49	35,24	33,57
76	31,30	32,12	36,36	35,20	33,86
77	30,81	32,43	36,49	35,29	33,76
78	30,82	32,03	36,42	35,33	33,96

Tab. 19 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.5.9 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 50°C

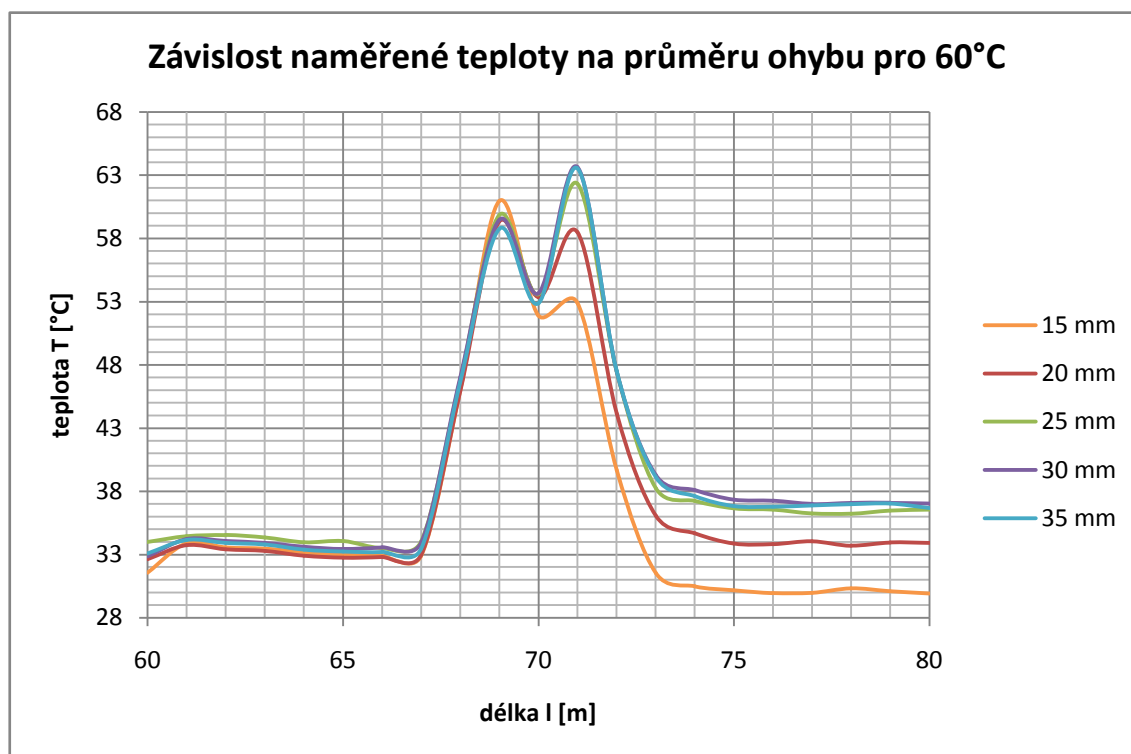


8.5.10 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 60°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	33,56	33,42	34,55	34,07	33,93
63	33,47	33,29	34,35	33,93	33,80
64	33,20	32,90	33,98	33,61	33,38
65	33,00	32,75	34,07	33,44	33,24
66	32,89	32,80	33,51	33,58	33,21
67	32,92	32,98	34,04	33,95	33,46
68	46,00	45,93	46,83	47,02	46,66
69	60,97	59,34	59,85	59,47	58,76
70	51,91	53,36	53,59	53,66	52,87
71	52,91	58,50	62,34	63,64	63,55
72	39,66	44,16	47,43	47,46	47,50
73	31,55	36,07	38,24	39,29	39,14
74	30,49	34,67	37,23	38,10	37,62
75	30,18	33,86	36,65	37,35	36,84
76	29,96	33,82	36,56	37,26	36,79
77	29,98	34,05	36,25	37,00	36,89
78	30,32	33,70	36,23	37,09	36,98

Tab. 20 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.5.11 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 60°C

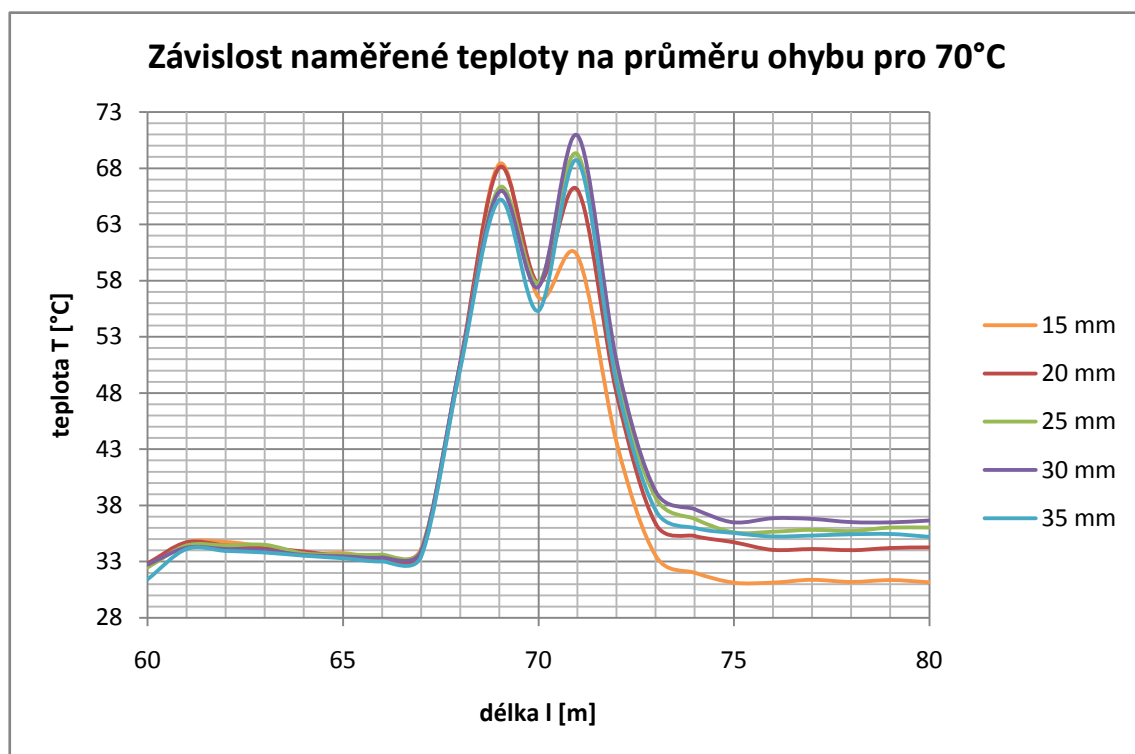


8.5.12 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 70°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	34,75	34,43	34,44	34,11	33,96
63	34,31	34,20	34,49	34,01	33,81
64	33,72	33,89	33,73	33,59	33,52
65	33,76	33,45	33,63	33,46	33,30
66	33,36	33,19	33,62	33,36	33,01
67	34,14	33,73	34,04	33,96	33,46
68	50,33	50,71	50,56	50,61	50,15
69	68,37	68,07	66,26	65,92	65,16
70	56,54	57,80	57,81	57,44	55,32
71	60,22	66,08	69,23	70,92	68,66
72	43,52	47,89	49,74	50,75	48,83
73	33,50	36,33	38,66	39,21	37,54
74	32,01	35,27	36,79	37,65	35,99
75	31,13	34,71	35,60	36,50	35,54
76	31,14	34,05	35,65	36,87	35,23
77	31,38	34,12	35,82	36,81	35,32
78	31,20	34,02	35,71	36,52	35,43

Tab. 21 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.5.13 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 70°C

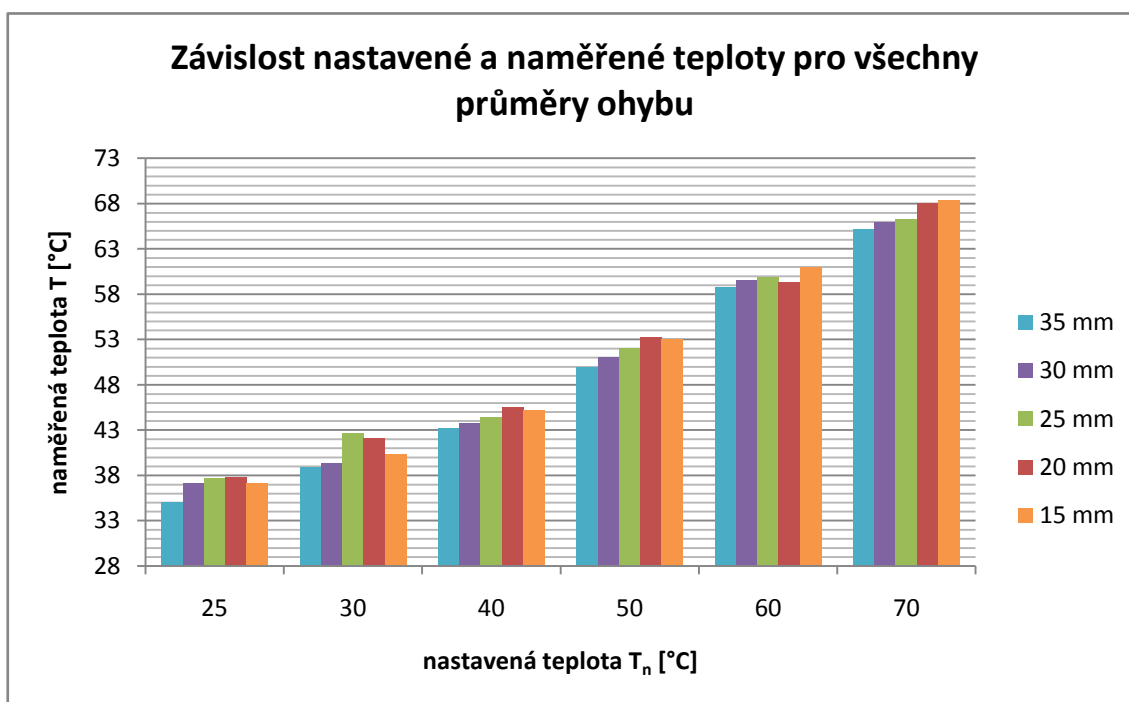


8.5.14 Naměřené maximální hodnoty teploty

Nastavená teplota T_n [°C]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
25	37,12	37,72	37,63	37,11	34,97
30	40,28	42,08	42,59	39,32	38,88
40	45,15	45,46	44,39	43,71	43,15
50	53,02	53,20	51,99	50,95	49,93
60	60,97	59,34	59,85	59,47	58,76
70	68,37	68,07	66,26	65,92	65,16

Tab. 22 Naměřené maximální hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.5.15 Graf závislostí nastavené a naměřené teploty

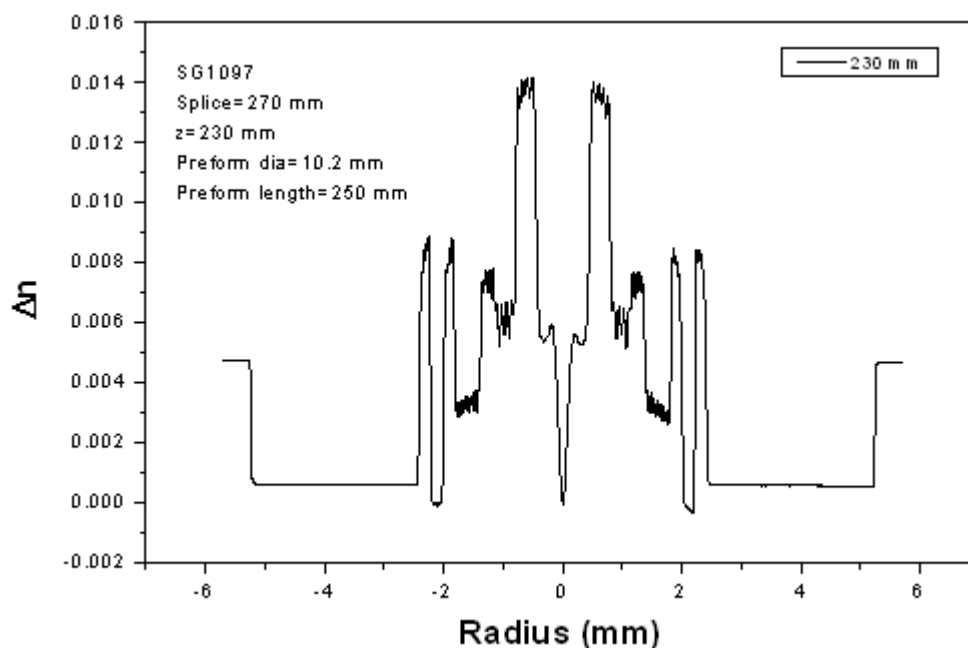


Z grafů je zřejmé, že při snižujícím se průměru ohybu vlákna naměřená teplota roste. Znamená to tedy, že měření teploty touto metodou je citlivé na ohyb vlákna. Děje se to u všech měřených teplot. U vyšších teplot je citlivost na ohyb menší. Naměřená celková teplota také velmi výrazně překračuje skutečnou nastavenou teplotu v okolí vlákna. Tato chyba je největší pro nízké teploty okolí vlákna. S postupným zahříváním vlákna se chyba snižuje a pro 40°C až 70°C již odpovídá naměřená teplota skutečné teplotě v okolí vlákna. Pokles teploty na vrcholu grafů je způsoben vyvedením této části vlákna mimo zahřívanou oblast. Tato část vlákna byla namotávána na válečky různých průměrů pro simulaci ohybu vlákna.

8.6 Měření optického vlákna SG1097

Katalogové označení sensorového optického vlákna je SG1097. Toto vlákno bylo vyrobeno na zakázku a nelze jej běžně koupit. Jedná se o experimentální sensorové optické vlákno. Profil indexu lomu vlákna zobrazuje obr. 31. Měřicí pracoviště bylo zapojeno podle popisu v kapitole 8.3. Při měření jsem postupoval tak jak je popsáno v kapitole 8.1 a využil při něm všechny přístroje popsané v kapitole 8.2. Naměřené hodnoty jsem získal ve formě souborů dat. Z těchto dat jsem vybral část údajů, které jsou významné. Rozdělil jsem je podle měřené teploty a zaznamenal do tabulek hodnot tab. 23 až tab. 29. Tyto údaje jsem zpracoval a výsledky vynesl do grafů.

8.6.1 Profil indexu lomu měřeného vlákna



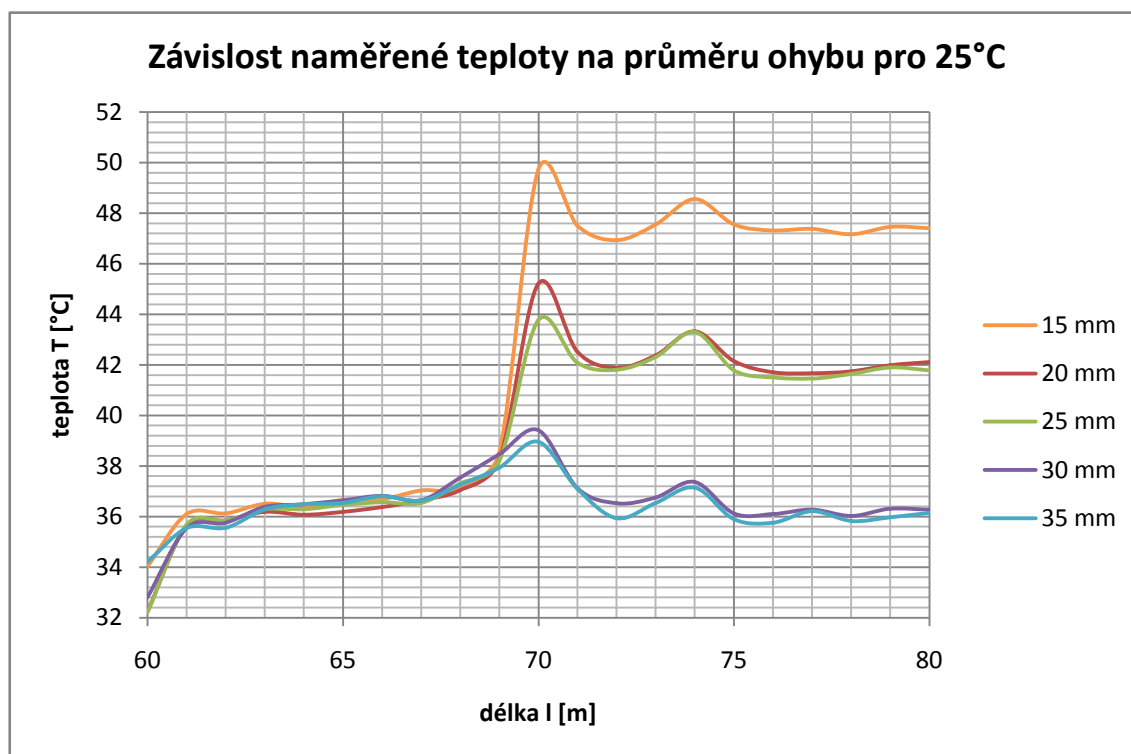
Obr. 31 Profil indexu lomu sensorového optického vlákna SG1097

8.6.2 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 25°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	36,13	35,85	35,84	35,76	35,56
63	36,51	36,19	36,29	36,39	36,29
64	36,38	36,07	36,29	36,49	36,49
65	36,66	36,19	36,47	36,65	36,54
66	36,69	36,38	36,57	36,82	36,81
67	37,04	36,64	36,54	36,65	36,63
68	37,13	37,05	37,32	37,54	37,26
69	38,55	38,24	38,21	38,47	37,94
70	49,72	45,21	43,77	39,42	38,96
71	47,50	42,52	42,09	37,12	37,10
72	46,93	41,88	41,81	36,53	35,94
73	47,55	42,38	42,32	36,76	36,55
74	48,55	43,33	43,30	37,37	37,15
75	47,55	42,15	41,79	36,12	35,90
76	47,32	41,71	41,50	36,10	35,76
77	47,38	41,67	41,46	36,28	36,22
78	47,16	41,74	41,64	36,03	35,83

Tab. 23 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.6.3 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 25°C

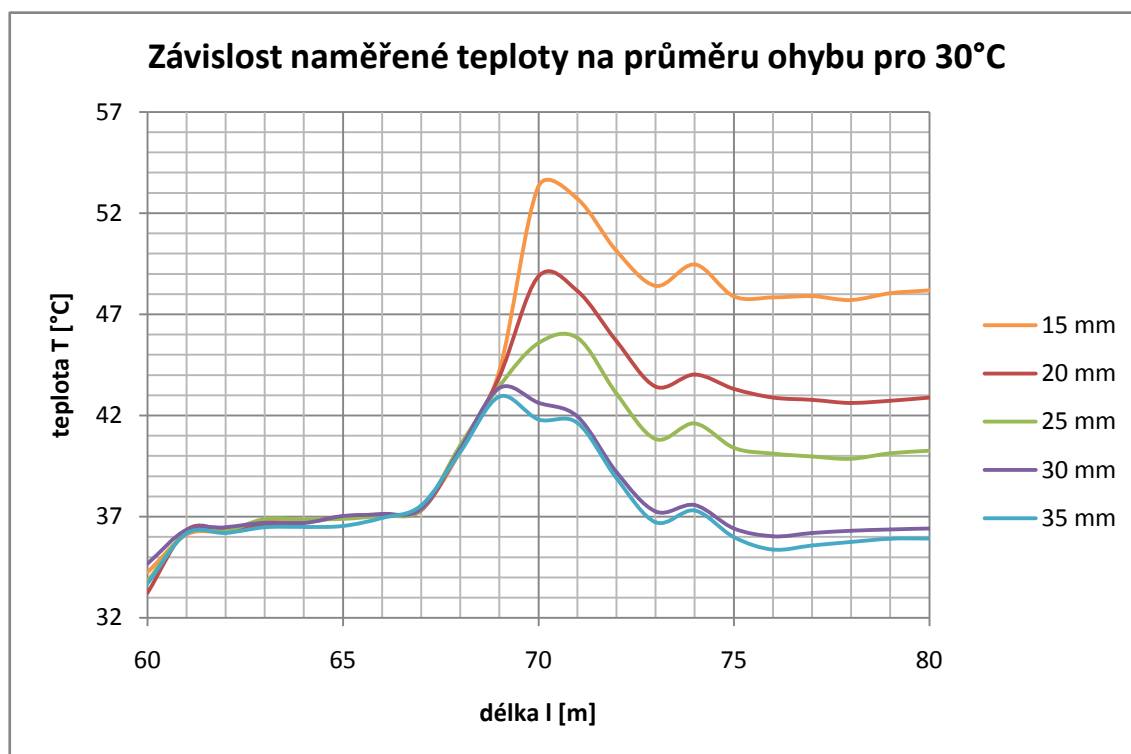


8.6.4 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 30°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	36,27	36,36	36,29	36,47	36,19
63	36,80	36,59	36,89	36,70	36,47
64	36,73	36,73	36,85	36,69	36,49
65	36,99	37,01	36,89	37,03	36,54
66	37,05	37,13	37,05	37,12	36,93
67	37,38	37,31	37,34	37,39	37,56
68	40,23	40,34	40,53	40,35	40,19
69	44,20	43,91	43,44	43,36	42,93
70	53,31	48,87	45,58	42,64	41,81
71	52,71	48,16	45,84	41,95	41,64
72	50,12	45,65	43,06	39,18	38,88
73	48,40	43,42	40,83	37,25	36,72
74	49,46	44,03	41,61	37,57	37,30
75	47,89	43,32	40,40	36,42	35,98
76	47,84	42,88	40,12	36,03	35,37
77	47,90	42,77	39,97	36,19	35,37
78	47,71	42,62	39,86	36,30	35,75

Tab. 24 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.6.5 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 30°C

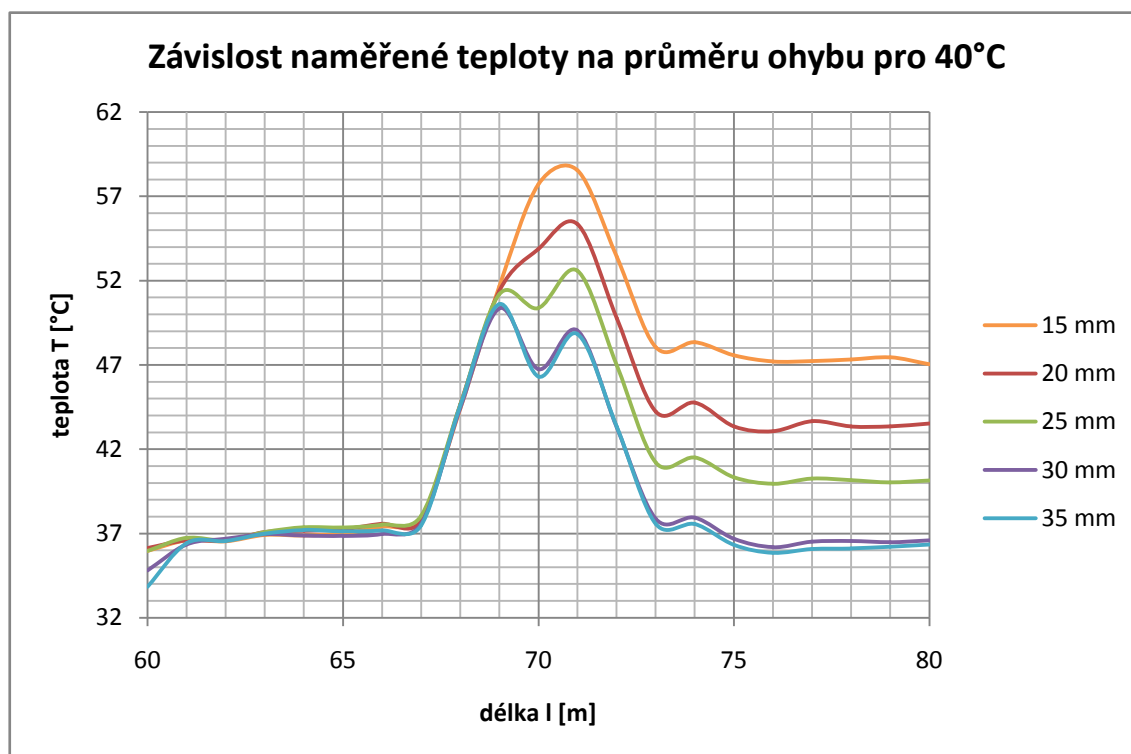


8.6.6 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 40°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	36,54	36,58	36,60	36,68	36,56
63	36,91	37,08	37,09	36,96	36,99
64	36,88	37,16	37,37	36,87	37,21
65	37,02	37,26	37,36	36,86	37,13
66	37,41	37,58	37,53	36,97	37,18
67	37,95	37,76	38,05	37,59	37,48
68	44,40	44,65	44,64	44,44	44,58
69	51,65	51,39	51,19	50,35	50,60
70	57,70	53,88	50,37	46,75	46,31
71	58,54	55,35	52,58	49,04	48,83
72	53,42	49,77	46,98	43,30	43,34
73	48,05	44,22	41,21	37,87	37,57
74	48,34	44,76	41,51	37,94	37,56
75	47,56	43,35	40,33	36,68	36,32
76	47,20	43,06	39,95	36,19	35,86
77	47,23	43,66	40,26	36,52	36,08
78	47,33	43,35	40,17	36,56	36,11

Tab. 25 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.6.7 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 40°C

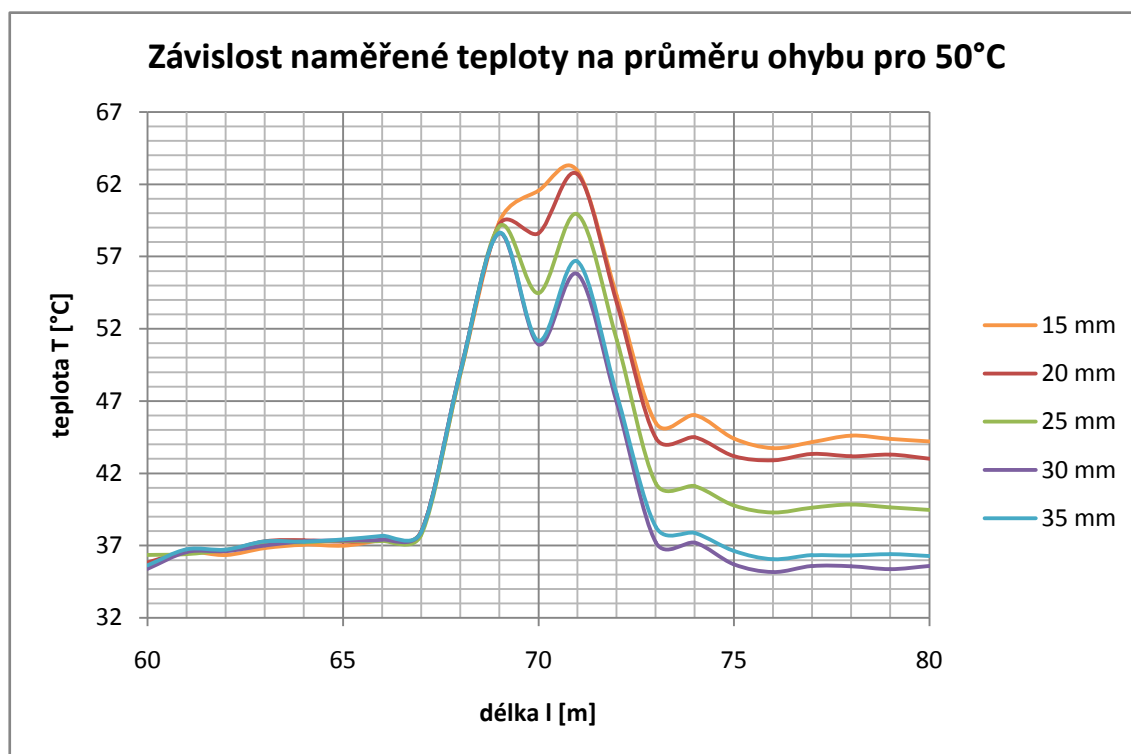


8.6.8 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 50°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	36,34	36,67	36,70	36,61	36,72
63	36,82	37,30	37,19	37,00	37,29
64	37,06	37,37	37,23	37,30	37,28
65	36,99	37,28	37,33	37,36	37,43
66	37,41	37,39	37,32	37,41	37,68
67	37,97	37,95	37,74	37,95	37,94
68	48,83	49,04	48,86	49,04	48,99
69	59,39	59,22	59,08	58,60	58,63
70	61,55	58,61	54,46	50,93	51,17
71	62,92	62,70	59,92	55,78	56,66
72	54,28	53,80	51,22	46,89	47,47
73	45,48	44,44	41,30	37,22	38,29
74	46,02	44,49	41,11	37,20	37,87
75	44,41	43,19	39,78	35,70	36,62
76	43,74	42,90	39,29	35,16	36,05
77	44,15	43,34	39,63	35,58	36,33
78	44,61	43,18	39,83	35,57	36,31

Tab. 26 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.6.9 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 50°C

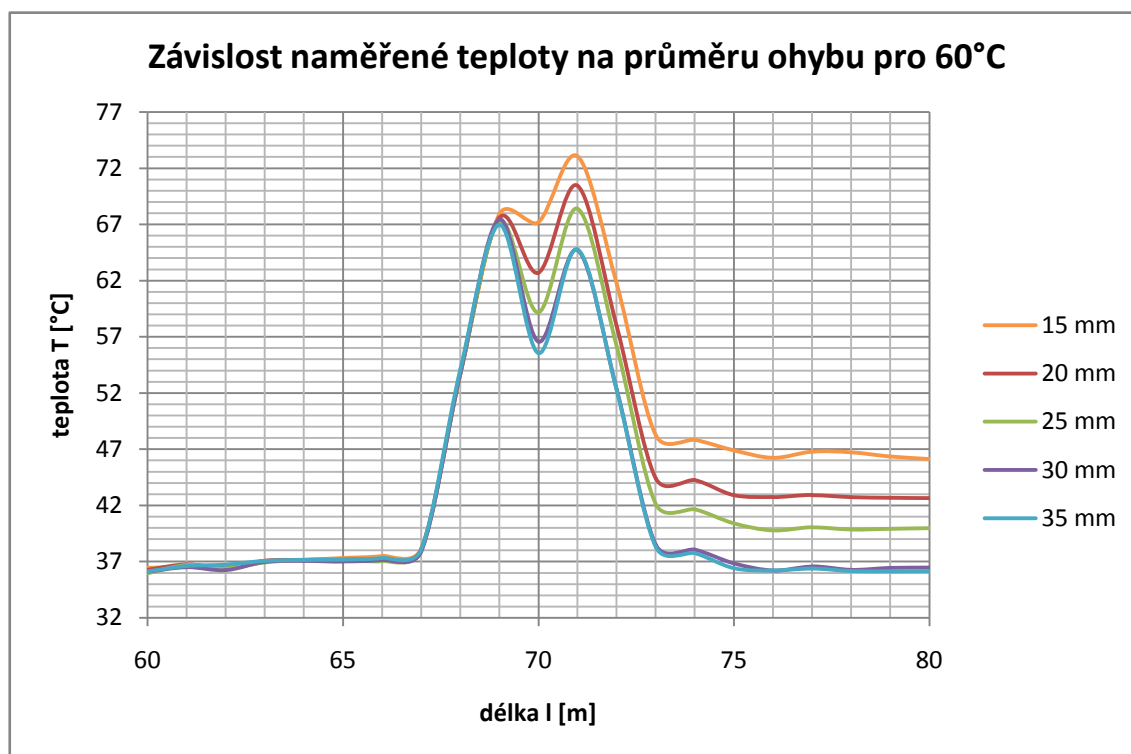


8.6.10 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 60°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	36,51	36,45	36,40	36,23	36,74
63	37,06	37,07	36,92	36,98	37,06
64	37,16	37,15	37,15	37,06	37,14
65	37,32	37,17	37,22	37,01	37,17
66	37,50	37,26	37,05	37,15	37,32
67	38,14	38,06	37,96	37,90	38,08
68	53,67	53,68	53,66	53,73	54,06
69	67,91	67,59	67,22	67,44	66,96
70	67,19	62,70	59,16	56,57	55,54
71	73,06	70,45	68,40	64,73	64,77
72	61,69	57,93	56,12	52,30	52,21
73	48,24	44,39	42,12	38,50	38,30
74	47,84	44,24	41,65	38,07	37,75
75	46,90	42,92	40,41	36,85	36,42
76	46,24	42,75	39,78	36,20	36,21
77	46,78	42,92	40,05	36,57	36,39
78	46,73	42,73	39,86	36,26	36,16

Tab. 27 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.6.11 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 60°C

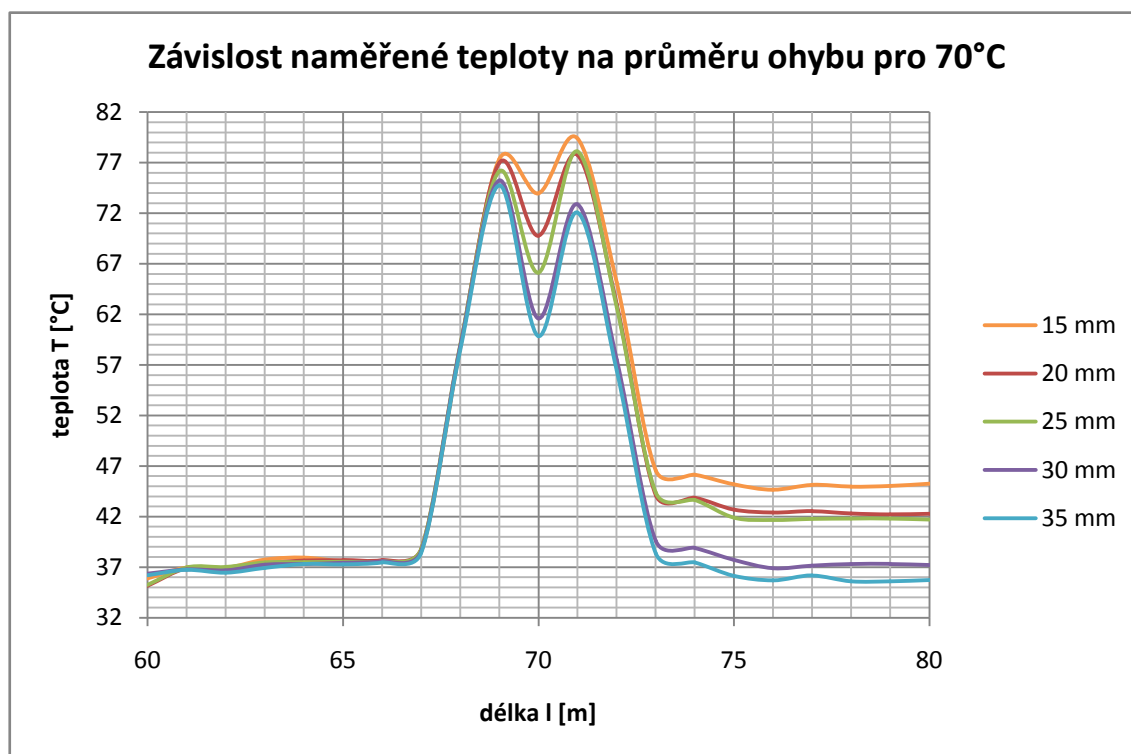


8.6.12 Naměřené hodnoty pro nastavenou teplotu 70°C

Délka l [m]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
62	36,94	36,95	37,02	36,69	36,45
63	37,75	37,39	37,48	37,24	36,95
64	37,94	37,65	37,50	37,32	37,31
65	37,59	37,71	37,55	37,43	37,27
66	37,60	37,70	37,58	37,59	37,48
67	38,55	38,81	38,81	38,57	38,42
68	58,69	58,82	58,99	58,82	58,47
69	77,35	76,97	76,13	75,24	74,74
70	73,96	69,77	66,12	61,60	59,84
71	79,40	77,77	78,10	72,87	72,06
72	65,14	62,98	62,68	57,50	56,44
73	46,57	44,13	44,37	39,59	38,36
74	46,15	43,88	43,64	38,91	37,47
75	45,18	42,70	41,89	37,72	36,16
76	44,67	42,41	41,67	36,89	35,69
77	45,14	42,54	41,78	37,16	36,18
78	44,96	42,31	41,82	37,31	35,60

Tab. 28 Naměřené hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.6.13 Graf závislostí pro nastavenou teplotu 70°C

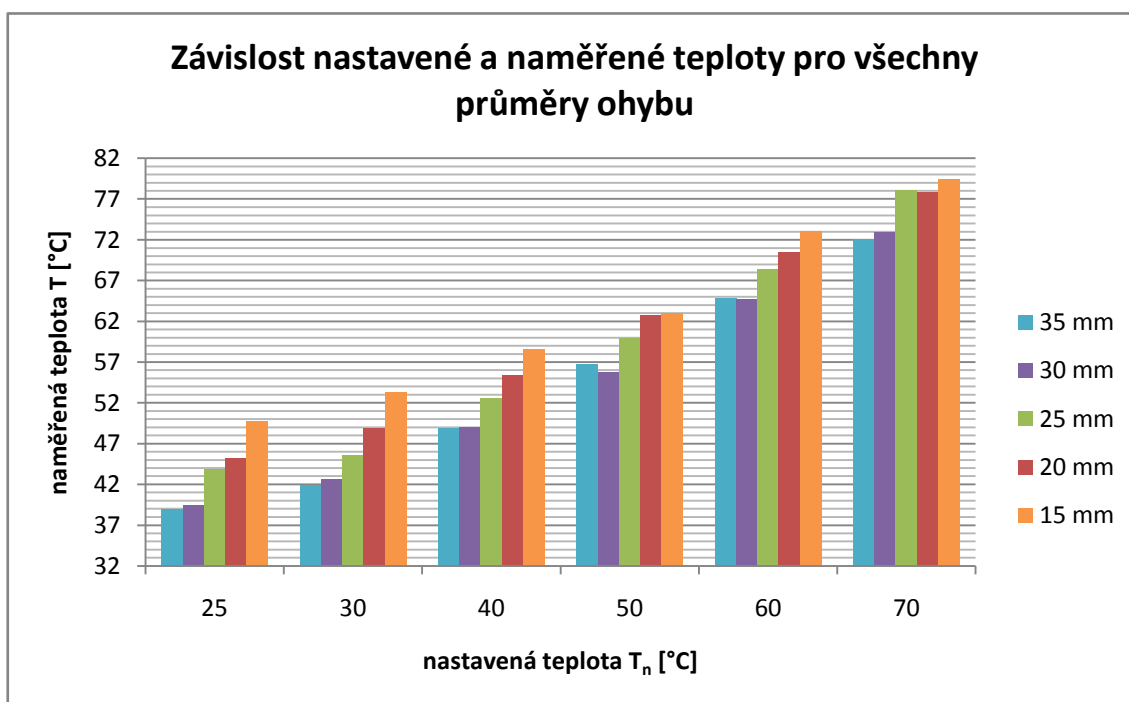


8.6.14 Naměřené maximální hodnoty teploty

Nastavená teplota T_n [°C]	Teplota vlákna T [°C] závislá na průměru ohybu [mm]				
	15	20	25	30	35
25	49,72	45,21	43,77	39,42	38,96
30	53,31	48,87	45,58	42,64	41,81
40	58,54	55,35	52,58	49,04	48,83
50	62,92	62,70	59,92	55,78	56,66
60	73,06	70,45	68,40	64,73	64,77
70	79,40	77,77	78,10	72,87	72,06

Tab. 29 Naměřené maximální hodnoty teploty v závislosti na průměru ohybu vlákna

8.6.15 Graf závislostí nastavené a naměřené teploty



Z grafů je zřejmé, že při snižujícím se průměru ohybu vlákna naměřená teplota roste. Znamená to tedy, že měření teploty touto metodou je citlivé na ohyb vlákna. Děje se to u všech měřených teplot. U vyšších teplot je citlivost na ohyb menší. Naměřená celková teplota také velmi výrazně překračuje skutečnou nastavenou teplotu v okolí vlákna. Tato chyba je největší pro nízké teploty okolí vlákna. S postupným zahříváním vlákna se chyba snižuje a pro 60°C a 70°C již odpovídá naměřená teplota skutečné teplotě v okolí vlákna. Pokles teploty na vrcholu grafů je způsoben vyvedením této části vlákna mimo zahřívanou oblast. Tato část vlákna byla namotávána na válečky různých průměrů pro simulaci ohybu vlákna.

8.7 Zhodnocení naměřených údajů

Proměřil jsem celkem tři speciální senzorová optická vlákna. Tyto vlákna byla vyrobena na zakázku a nelze je běžně koupit. Pro měření teploty všech těchto vláken jsem využil metodu zpětného Ramanova rozptylu. Při měření jsem používal přístroj Sentinel-DTS popsaný v kapitole 8.2. Měření pomocí tohoto přístroje je velmi jednoduché. Naměřené hodnoty zobrazuje přístroj v reálném čase na monitoru a také je ukládá ve formě datového souboru. Tyto datové soubory jsem poté využil k zobrazení naměřených údajů v grafech.

Měřením jsem zjišťoval, jestli existuje závislost naměřené teploty na ohybu optického vlákna. Zjistil jsem, že všechny měřené vlákna se chovají velmi podobě. Z grafů je zřejmé, že při snižujícím se průměru ohybu vlákna naměřená teplota roste. Změna naměřené teploty od skutečné je v řádu několika °C. Znamená to, že měření teploty touto metodou je citlivé na ohyb vlákna. Tento jev je patrný u všech měřených teplot. U vyšších teplot je citlivost na ohyb menší. Rozdíl teplot pro nejmenší a největší průměr ohybu je tedy menší než při měření nižších teplot. Při měření touto metodou v terénu je velmi žádoucí, aby bylo vlákno nataženo co nejvíce rovně bez ohybů. Naměřená celková teplota také velmi výrazně překračuje skutečnou nastavenou teplotu v okolí vlákna. Tato chyba je největší pro nízké teploty okolí vlákna. S postupným zahříváním vlákna se chyba snižuje. Pro vlákna SG1082 a SG1097 odpovídá naměřená teplota v okolí vlákna skutečným nastaveným teplotám v rozsahu 60°C až 70°C. Pro vlákno SG1087 odpovídá naměřená teplota v okolí vlákna skutečným nastaveným teplotám v rozsahu 40°C až 70°C. Z toho vyplývá, že použití vlákna SG1087 je vhodnější i pro měření nižších teplot. Pokles teploty na vrcholu grafů je způsoben vyvedením této části vlákna mimo zahřívanou oblast. Tato část vlákna byla namotávána na válečky různých průměrů pro simulaci ohybu vlákna. Pro grafy závislosti nastavené a naměřené teploty jsem vybral hodnoty teploty, které jsem naměřil na prvním úseku vlákna vloženého do plechové krabičky (viz. kapitola 8.3).

8.8 Stanovení teplotního a prostorového rozlišení

Dosah DTS systémů založených na Ramanově rozptylu je asi 8 až 10 km. Prostorová rozlišitelnost je standardně 1 m s přesností ± 1 °C, při teplotním rozlišení 0,01 °C. S touto přesností jsem pracoval při měření. Pro extrémní DTS systémy je prostorová rozlišitelnost 0,5 m a teplotní 0,05 °C. Jedná se o velmi přesné měřicí systémy. Před každým měřením je nutné nastavit integrační dobu, po kterou se bude provádět měření a počet iterací. Čím je delší integrační doba a počet iterací, tím dochází k většímu zpřesnění a vyhlazení teplotní křivky.

9 Porovnání obou metod měření

Pracoval jsem se dvěma metodami měření teploty. V obou případech se jedná o metody distribuovaného měření teploty s využitím optoelektronických vláknových systémů. Každá z metod měření pracuje na jiném principu a výstupem je jiný typ hodnot. Při měření pomocí Braggových mřížek jsem zkoumal závislost změny propuštěné vlnové délky a výkonu na změně teploty mřížky. Naopak při měření teploty pomocí Ramanova jevu jsem zkoumal vliv ohybu senzorového optického vlákna na naměřenou teplotu. Údaje, které jsem takto získal se obtížně porovnávají, a proto budu srovnávat samotné měřicí metody.

9.1 Přesnost měření teploty

Výsledkem měření je hodnota veličiny získaná přímo měřením. Na tuto hodnotu veličiny a tedy její přesnost může působit řada vlivů. Hlavními faktory které ovlivňují přesnost měření jsou parametry zdroje záření a detektoru v měřicím přístroji. Dále tuto hodnotu ovlivňuje útlum spojek a nedokonalosti v samotném optickém vlákně, tyto vlivy ale bývají zanedbatelné a odstraňují se opakováním měření.

Při měření teploty pomocí Braggových mřížek byly použity laboratorní zdroje záření. Tyto zdroje vysílají světlo s přesnou vlnovou délkou. Jako detektor sloužil spektrometr WA-7600 který je velmi citlivý a přesný měřicí přístroj. Měřenou hodnotou je propuštěná vlnová délka a výkon. Měřicí přístroj WA-7600 detekuje hodnotu vlnové délky s přesností v řádu 0,0001 nm a hodnotu výkonu s přesností v řádu 0,001 μW .

Při měření teploty metodou Ramanova zpětného rozptylu byl využit měřicí přístroj Sentinel-DTS který má přesný zdroj záření i detektor již integrován. Měřenou hodnotou je v tomto případě teplota v okolí senzorového optického vlákna. Měření touto metodou lze dosáhnout velmi přesných výsledků. Hodnotu teploty nám měřicí přístroj zobrazuje v řádu 0,01°C s přesností ± 1 °C.

Obě popisované metody se řadí k nejpresnějším měřicím systémům pro měření teploty. Měření první metodou pomocí spektrometru WA-7600 však může být ovlivněno chybou obsluhy, protože naměřené údaje se musí odečítat a zapisovat ručně. Také je toto měření více náchylné na chybu způsobenou nepřesností zdroje záření, při použití např. nevhodného zdroje záření. V případě měření druhou metodou pomocí přístrojem Sentinel-DTS toto odpadá, protože přístroj naměřené hodnoty zapisuje do datového souboru. Tyto data je poté možné

zpracovat automaticky za použití vhodného softwaru. Také odpadá problém s použitím nevhodného zdroje záření, protože tento je již integrován a přizpůsoben parametrům přístroje.

9.2 Opakovatelnost měření

Opakovatelnost měření vyjadřuje to, že výsledky po sobě následujících měření téže veličiny provedené za stejných podmínek jsou shodné. V tomto aspektu jsou obě měřicí metody na téměř stejné úrovni. Při měření Braggových mřížek však musíme použít stejný zdroj záření u všech prováděných měření. Toto je poněkud obtížnější pokud máme například více zdrojů stejného typu. V takovém případě je vhodné si použitý zdroj označit a používat jen ten jeden. Tento problém odpadá při měření pomocí Ramanova rozptylu přístrojem Sentinel-DTS. Tento přístroj má zdroj záření již integrovaný. Obě měřicí metody jsou velmi dobře opakovatelné. Pokud zvolíme stejné měřicí přístroje ve všech měřeních tohoto typu, měli bychom dosáhnout stejných výsledků.

9.3 Náročnost měření

Pod tímto pojmem si můžeme představit náročnost na čas potřebný pro dokončení měření a také pracnost měření. Dále náročnost na technickou zručnost a znalosti obsluhy měřicích přístrojů nutné pro vykonávání měření.

Čas nutný pro dokončení měření je pro obě metody velmi odlišný. Při měření Braggových mřížek bylo možné odečítat naměřené hodnoty okamžitě po připojení mřížky do měřicího řetězce. Dokončení kompletního proměření jedné mřížky tedy zdržovalo jen čekání na ohřev mřížky kalorimetrem. Kompletní proměření jedné mřížky trvalo asi jednu hodinu. U metody měření pomocí Ramanova jevu je časová náročnost výrazně větší. Délka měření je zde dána iterační dobou nastavenou v měřicím přístroji a také počtem iterací. Čím je tato iterační doba delší a počet iterací větší tím se zpřesňují naměřená data, ale také podstatně roste celková doba měření. Je opět nutné připočíst dobu potřebnou pro ohřev vlákna kalorimetrem. Proměření jednoho vlákna touto metodou trvalo asi dvě hodiny při iterační době nastavené na dvě minuty. Pokud by byla použita delší iterační doba, měření by se tím výrazně prodloužilo.

S časovou náročností úzce souvisí také pracnost měření. U obou metod měření je nutné nejdříve připravit měřicí pracoviště, optické vlákna opatřit konektory a zapojit všechny přístroje. Samotné měření se skládá z obsluhy měřicího přístroje, připojování měřené mřížky či optického vlákna a odečítáním naměřených hodnot. Příprava ani samotné měření nejsou pracné.

Obsluha, která provádí měření, musí být technicky zručná a znát postupy používané při práci s optovláknovými systémy. Těmito postupy se rozumí především správné opatření vláknem konektory a správné zapojení měřicího řetězce. Dále musí technik ovládat obsluhu všech měřících přístrojů. Také musí být seznámen s bezpečnostními předpisy při práci s optickými zdroji a to především s lasery.

9.4 Srovnání použitého technického vybavení

Pro měření oběma metodami jsem použil vysoce specializované měřicí přístroje. Spektrometr WA-7600 je určen pro měření vlnové délky a výkonu přivedeného optického záření. Naměřené údaje (spektrum měřeného signálu) zobrazuje na displeji v reálném čase. Přístroj nemá vlastní zdroj optického záření, a proto je nutné použít zdroj externí. Tento přístroj lze využít nejen při měření Braggových mřížek ale i při jiných měřeních v laboratoři při kterých se zjišťuje spektrum signálu. Oproti tomu Ramanův OTDR-metr Sentinel-DTS lze použít pouze pro měření teploty podél optického vlákna. Naměřené údaje (graf teploty v závislosti na vzdálenosti) zobrazuje přístroj v reálném čase na monitoru a ukládá do datového souboru. Díky tomu lze data později zpracovat a vybrat z nich jen podstatné (zajímavé) údaje. Výhodou je že přístroj má integrovaný zdroj optického záření (laser). Není tedy nutné např. do terénu vozit další přístroje. Nevýhodou obou přístrojů jsou větší rozměry a hmotnost, především u přístroje Sentinel-DTS. Při obou měřících metodách byl pro zahřívání vlákna použit kalorimetr Memmert. Tento přístroj je laboratorní a není určen do terénu.

9.5 Srovnání ceny technického vybavení

Cena jednotlivých použitých přístrojů je poměrně vysoká, jedná se totiž o precizní měřicí přístroje. Proto si tyto přístroje mohou dovolit jen větší firmy nebo výzkumné ústavy, které je nezbytně nutně potřebují. Zvláště měřicí přístroj Sentinel-DTS je extrémně nákladný. Přístroj je vyráběn v malé sérii a jeho cena je v řádu několika milionů korun. Ostatní přístroje jako je kalorimetr Memmert a spektrometr WA-7600 jsou méně nákladné a jejich cena se pohybuje v řádu několika stovek tisíc korun. Měření teploty těmito metodami je proto vhodné spíše pro výzkumné účely a v běžné praxi se příliš nevyužívá.

10 Závěr

Teplo nás provází celým životem. Již od nepaměti se lidé snaží teplo vyrobit tak, aby přežili nebo zkvalitnili svůj život. S nástupem technické revoluce se objevila potřeba teplo nejen vytvářet, ale i měřit jeho hodnotu. V mnoha průmyslových odvětvích je přesné měření teploty podstatou výrobní technologie. Distribuované optovláknové systémy jsou v oblasti měření teploty stále ještě novinkou, kterou je třeba dostat do povědomí laické i odborné veřejnosti. Tento způsob měření teploty disponuje obrovskou variabilitou, kterou jiné systémy měření nenabízí. Lze jej použít pro měření v tunelech nebo hrázích přehrad, ale i v laboratoři.

V diplomové práci jsem se věnoval problematice dvou typů vláknově optických senzorů. Jedním z nich byl senzor pracující na principu Braggových mřížek. Další senzor, který jsem zkoumal, využívá ke své činnosti Ramanův rozptyl. Práci jsem strukturoval do několika částí. V první z nich jsem se zabýval úvodem do problematiky a popisoval zde optická vlákna a zdroje optického záření. Další oblastí, kterou jsem se v práci popisoval, je princip funkce distribuovaného systému měření. Zhodnotil jsem jeho výhody a nevýhody. Následující kapitoly se zabývaly oběma typy distribuovaných vláknově optických senzorů. Je zde podrobně popsán princip jejich funkce s popisem jednotlivých podtypů těchto senzorů. Oba senzory jsem použil v praktické části a provedl jsem s nimi měření teploty. Hlavní a nejobsáhlejší část práce tvoří výsledky a popis praktických laboratorních měření. Jsou zde uvedeny výsledky měření, kterých bylo dosaženo u obou typů vláknově optických senzorů.

V první části praktické práce jsem se zabýval chováním Braggových mřížek při působení různých okolních teplot. K vlastnímu měření bylo využito pět optických vláken s pěti různými Braggovými mřížkami. Jako zdroje záření byly použity dva typy laserů. Jedním z nich byl širokospektrální laser Noyes OLS2 dual který je běžně využíván ve výuce na katedře telekomunikační techniky. U tohoto optického zdroje je možné zvolit, zda bude vyzařovat světlo s vlnovou délkou 1550 nm nebo s vlnovou délkou 1310 nm. Dále jsem použil laser Idil který je úzkospektrální. Pro zobrazení výsledného spektra, které Braggova mřížka propustí jsem použil měřicí přístroj WA-7600. Každé vlákno obsahující Braggovu mřížku bylo proměřeno zvlášť. Mřížky jsem postupně zahříval od 25°C až do konečné teploty měření 70°C s krokem 5°C. Jako vstupní zdroj jsem nejdříve použil širokospektrální laser Noyes. Tento laser nebyl pro měření vhodný. Spektrum tohoto zdroje obsahuje větší množství maxim. Největším problémem byla jeho nestabilita a z toho plynoucí obtížné odečítání naměřených hodnot. Pro pozorování vlivu teploty na mřížku je vhodnější použít laser Idil který je stabilní a vyzařuje pouze jedno

maximum. Při měření jsem zjistil, že se vlnová délka a výkon propuštěný Braggovou mřížkou se vzrůstající teplotou mění. U všech měřených mřížek vlnová délka rostla. Výkon přenesený prvními třemi mřížkami roste při použití optického zdroje Noyes a naopak klesá při použití optického zdroje Idil. Pro měření posledních dvou mřížek jsem použil pouze zdroj Noyes. V tomto případě výkon se vzrůstající teplotou klesá. Naměřené hodnoty vlnové délky a výkonu s příslušnými grafy pro oba typy optických zdrojů jsou uvedeny v kapitolách 7.4 až 7.8. Dosažené výsledky jsem zhodnotil v kapitole 7.9. V závěrečném zhodnocení měření je také uvedeno prostorové a teplotní rozlišení této metody měření. Cílem tohoto měření bylo pochopit reakce Braggových mřížek na změnu teploty a také zjistit která optické zdroje jsou pro takové měření vhodné.

V druhé části praktické práce jsem se zabýval měřením teploty pomocí Ramanova jevu. Zkoumal jsem vliv ohybu sensorového optického vlákna na hodnotu naměřené teploty. K vlastnímu měření bylo využito třech speciálních sensorových optických vláken. Tyto vlákna byla vyrobena na zakázku a nelze je běžně koupit. Pro zobrazení naměřené teploty byl použit měřicí přístroj Sentinel-DTS. Tento měřicí přístroj má v sobě zabudovaný zdroj i detektor optického záření. Každé sensorové optické vlákno bylo proměřeno zvlášť. Optická vlákna jsem postupně zahříval na teplotu 25°C, poté na 30°C a dále až do konečné teploty měření 70°C s krokem 10°C. Zjistil jsem, že je naměřená teplota ovlivněna ohybem optického vlákna. U všech optických vláken se naměřená teploty zvyšovala se snižujícím se průměrem ohybu optického vlákna. Zajímavé bylo také to, že v několika případech (pro nižší nastavené teploty okolí vlákna) neodpovídala naměřená teplota předpokládané nastavené teplotě v okolí optického vlákna. Tento rozdíl byl i v desítkách °C. Pro nejvyšší nastavené teploty okolí optického vlákna (50°C až 70°C) již naměřená teplota odpovídala té nastavené. Takto se chovala všechna měřená optická vlákna. Naměřené hodnoty teploty s příslušnými grafy jsem uvedl v kapitolách 8.4 až 8.6. Dosažené výsledky jsem zhodnotil v kapitole 8.7. V závěrečném zhodnocení měření je také uvedeno prostorové a teplotní rozlišení této metody měření. Cílem tohoto měření bylo pochopit vliv útlumu způsobeného ohybem optického vlákna na měření teploty metodou Ramanova zpětného rozptylu.

Literatura

- [1] DOLEČEK, J.: *Moderní učebnice elektroniky – 3. díl: Optoelektronika – optoelektronické prvky a optická vlákna*, 1. vydání, Praha, BEN – technická literatura, 2005, 160 str., ISBN 80-7300-184-5
- [2] Wikipedie, otevřená encyklopedie [online], dostupné z www: <http://cs.wikipedia.org>
- [3] PanWiki [online], dostupné z www: <http://panwiki.panska.cz>
- [4] DataSheet k SensorNET DTS, fy. SensorNET
- [5] Safibra, produktové materiály DTS Power, [online], 2007, dostupné z www: http://www.safibra.cz/download/DTS_Power.pdf
- [6] LÁTAL, J., KOUDELKA, P., HANÁČEK, F., ŠIŠKA, P.: *Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty*, [online], 2010, dostupné z www: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=uvod-do-distribuvanych-optovlaknovych-systemu-zalozenych-na-ramanove-jevu-pro-mereni-teploty&cislocclanku=2010030001>
- [7] OTHONOS, A., KALLI, K.: *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Boston, ARTECH HOUSE, INC., 1999, 430 str., ISBN 0-89006-344-3
- [8] HORGOSOVÁ, K.: *Měření teploty okolí pomocí braggovských vláknově optických mřížek*, Ostrava, 2009, 50 str., diplomová práce, VŠB-TUO
- [9] LÁTAL, J., KOUDELKA, P., HANÁČEK, F., ŠIŠKA, P., SKAPA, J.: *Nasazení DTS systému v oblasti obnovitelných zdrojů*, In zborníku 11. CELOSLOVENSKÝ SEMINÁR ELEKTROTECHNIKOV, [CD-ROM], Trenčín, MARKAB spol. s.r.o., Alexandra Rudnaya 21, 010 01 Žilina, Slovenská republika, 2009, str. 23-27, ISBN 978-80-89072-51-4
- [10] LÁTAL, J., KOUDELKA, P., HANÁČEK, F.: *Využití distribuovaných optovláknových systémů při detekci průvanu v jeskynních systémech*, Elektrevue, 2010-5, str. 1-7, ISSN 1213-1539
- [11] MARŠÁLEK L.: *Optická vlákna*, [online], Ostrava, 2006, dostupné z www: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>